PHILIPS

CURSUS BEDRIJFSELEKTRONICA

Elektronische componenten

Leerlingboek BS 3

Philips Nederland B.V. - Afd. Onderwijsactiviteiten

Tweede, herziene druk 1976

Vijfde druk 1979

161220·3

PHILIPS

CURSUS BEDRIJFSELEKTRONICA

Elektronische componenten

Leerlingboek BS 3

Philips Nederland B.V. - Afd. Onderwijsactiviteiten

Tweede, herziene druk 1976

Vijfde druk 1979

161220 • 3

D E E L B

INHOUDSOPGAVE

b

B 121

H E R H A L I N G   S P O E L

INLEIDING

In het A-deel van de cursus hebben we in aansluiting op het magnetisme de spoel behandeld. In deze les gaan we dit nog eens opfrissen.

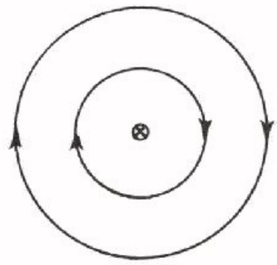
Werk deze herhalingsles grondig door.

Als u iets niet duidelijk is, vraag het dan aan uw leraar.

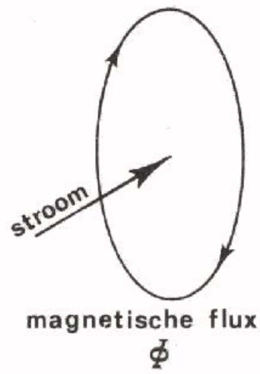
MAGNETISME

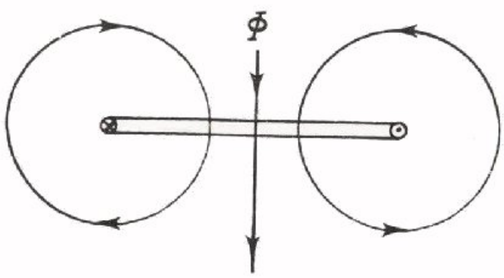
Kort herhalen we de grondbeginselen van het magnetisme.

- Een *(permanente) magneet* is een stuk staal of ijzerverbinding, dat de eigenschap heeft stukjes ijzer aan te trekken.
- Hangt men een staafmagneet in het midden op, dan wijst zijn ene kant (de z.g. *noordpool*) ongeveer naar het noorden en de andere kant (de z.g. *zuidpool*) ongeveer naar het zuiden.
- Een *kompas* heeft een klein draaibaar opgesteld staafmagneetje, dat dienst doet om de noord-zuid richting te bepalen.
- Gelijknamige polen stoten elkaar af en ongelijknamige trekken elkaar aan.
- Een geleider waar stroom door gaat heeft altijd een magnetisch veld om zich heen. Dit veld vormt als het ware een "ring" om de geleider. We zeggen dat het veld met de geleider is *gekoppeld*.



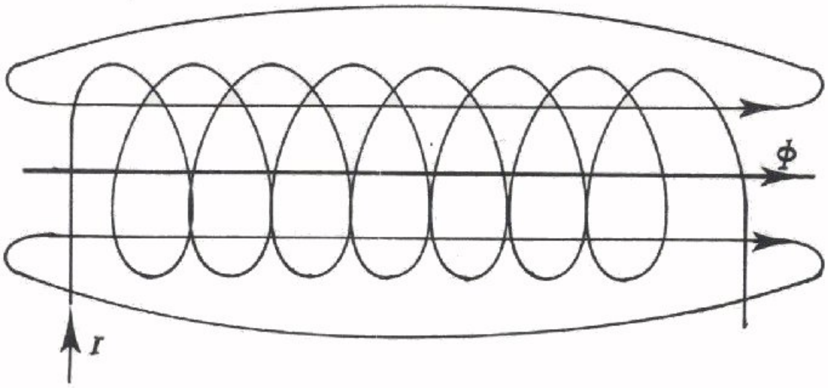
- Het magnetisch veld oefent een krachtsinvloed uit, die men kan constateren door een kompasnaaldje in het veld te brengen. De krachtsinvloed noemen we de *magnetische flux* Φ. In tekeningen geven we deze aan door middel van *fluxlijnen*. De pijlpuntjes op de fluxlijnen geven de richting aan, waarin de noordpool van een kompasnaaldje zal wijzen.
- De richting van de elektrische stroom en het bijbehorend magnetische veld volgen uit de *rechtse schroefregel*.





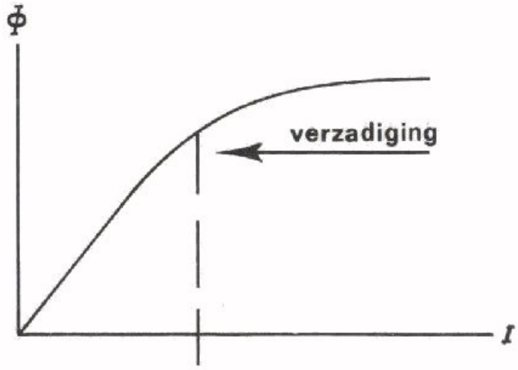
Ook met een stroomvoerende lus of *winding* is een magnetisch veld gekoppeld.

- Een aantal windingen vormt samen een *spoel*, waarmee ook weer een magnetisch veld is gekoppeld



- Het magnetisch veld van een spoel kan men aanzienlijk versterken door er een *ijzeren kern* in aan te brengen.

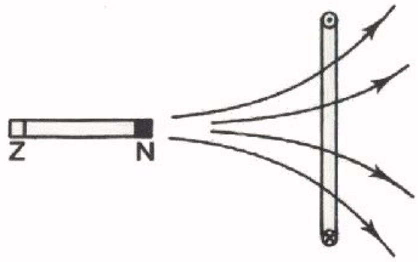
- Laat men de stroom I door een spoel met ijzerkern toenemen, dan neemt de flux Φ aanvankelijk ongeveer evenredig toe met de stroom, omdat er al maar meer elementair-magneetjes gericht worden.
  Bij grotere stromen loopt het ijzer *in verzadiging*. Alle elementair-magneetjes zijn dan gericht en Φ neemt nog nauwelijks toe.



- Voor *magneetpolen* geldt de regel, dat ongelijknamige polen elkaar aantrekken en gelijknamige elkaar afstoten. Voor *magnetische velden* geldt, dat zij altijd zullen proberen samen te vallen.

- Gaat er door een geleider een *wisselstroom*, dan is er met die geleider een eigen wisselend magneetveld gekoppeld.

- Ook het omgekeerde is waar:
  Als een winding gekoppeld wordt met een wisselend magnetisch veld, dan wordt in de winding een wisselspanning opgewekt. Deze spanning veroorzaakt op zijn beurt weer een wisselstroom in de gesloten winding.
  De opgewekte spanning heet *inductiespanning*. Hoe sneller het magnetisch veld verandert, des te groter is de opgewekte inductiespanning.



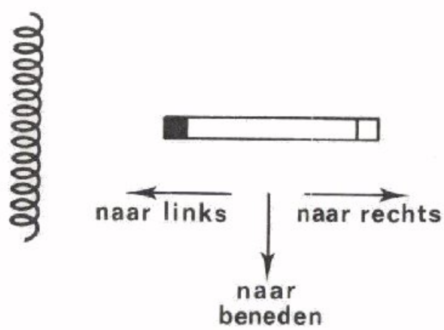
- Koppelt met een spoel met een wisselend magnetisch veld, dan wordt er in elke winding een inductiespanning U_{ind} opgewekt. Voor de gehele spoel met n windingen staan de opgewekte inductiespanningen in serie, zodat de totale spanning nu n x zo groot wordt. Hoe meer windingen en hoe snellere veldwisseling, des te groter is U_{ind}.

TEST UZELF

1. Als men door een spoel met ijzeren kern een steeds grotere stroom voert, dan loopt het ijzer in verzadiging. Dit wil zeggen, dat:

het ijzer zo heet wordt dat het ontmagnetiseerd wordt.	O
de magnetische flux nog maar weinig toeneemt.	O
de wervelstroomverliezen kleiner worden ten opzichte van de koperverliezen.	O
de spoel zich gaat gedragen als een zwakke permanente magneet.	O

2.



In de spoel wordt een inductiespanning opgewekt als de permanente magneet:

naar links wordt bewogen.	O
naar beneden wordt bewogen.	O
naar rechts wordt bewogen.	O
in een richting loodrecht op het papier wordt bewogen.	O

DE CAPACITEIT VAN EEN CONDENSATOR EN DE ZELFINDUCTIE VAN EEN SPOEL

- De capaciteit C van een condensator is de verhouding tussen de lading Q op elk van de platen en de bijbehorende spanning U tussen de platen.

  $$C = \frac{Q}{U}.$$

  Wordt C door een constante gelijkstroom gedurende t seconden geladen, dan geldt: de lading Q is gelijk aan $I.t$. We kunnen dan schrijven:

  $$\boxed{C = \frac{I.t}{U}}$$

  De capaciteit is blijkbaar de verhouding tussen de "toegevoerde stroom maal tijd" en de daardoor ontstane spanning. Hoe langer men een stroom I toevoert, tot des te hoger spanning U de condensator wordt geladen.

- De zelfinductie van een spoel:

  $$\boxed{L = \frac{U.t}{I}}$$

  De zelfinductie is de verhouding tussen de "toegevoerde spanning maal tijd" en de daardoor ontstane stroom. Hoe langer men een spanning U aan een spoel toevoert, tot des te groter waarde de stroom I aangroeit.

  Als eenheid van zelfinductie gebruikt men de "henry", H. Voert men aan een spoel gedurende 1 seconde een spanning toe van 1 V en is de stroom daardoor 1 A geworden, dan heeft de spoel een zelfinductie L van 1 H.

TEST UZELF

Aan een ideale spoel voert men gedurende 10 µs een spanning toe van 100 V. De stroom groeit dan aan van 0 tot 10 mA.

De zelfinductie van deze spoel is: $L =$ [ ]

DE REACTANTIE

Als we een sinusvormige spanning op een spoel aansluiten, dan gaat er een sinusvormige stroom lopen.

De verhouding $\frac{u}{i}$ is de wisselstroomweerstand.

De wisselstroomweerstand van een spoel noemt men de "reactantie". Deze geeft men aan met X_L.

De reactantie X_L blijkt gelijk te zijn aan:

$$X_L = 2\pi fL = \omega L$$

X_L: reactantie Ω
f: frequentie Hz
L: zelfinductie H.

Ook de wisselstroomweerstand van een condensator noemt men "reactantie". Deze duidt men aan met X_C. De reactantie van een condensator bedraagt:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C}$$

X_C: reactantie Ω
f: frequentie Hz
C: capaciteit F.

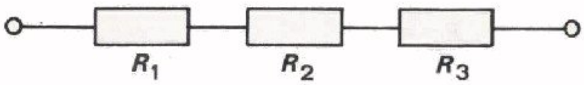
TEST UZELF

Bij welke frequentie zijn de reactanties van een spoel van 4 mH en een condensator van 0,1 μF aan elkaar gelijk?

f =

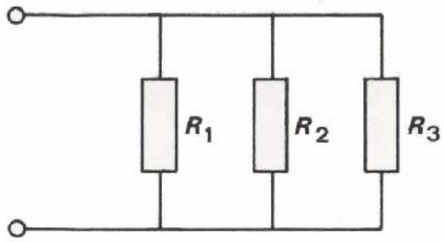
SERIE- EN PARALLELSCHAKELING VAN SPOELEN

Bij weerstanden in serie geldt voor de vervangingweerstand:



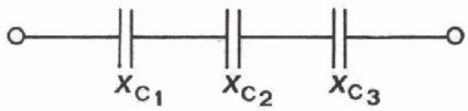
$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots$$

Bij weerstanden parallel geldt voor de vervangingsweerstand:



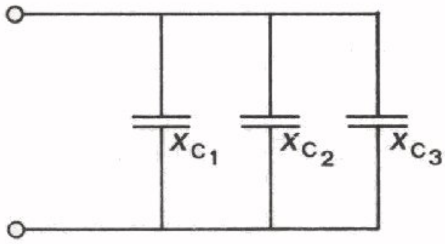
$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots$$

Bij condensators in serie geldt voor de vervangings*reactantie:*



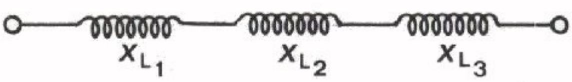
$$X_{C_s} = X_{C_1} + X_{C_2} + X_{C_3} + \ldots$$

Bij condensators parallel geldt voor de vervangings*reactantie:*



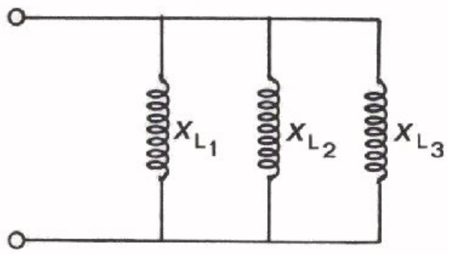
$$\frac{1}{X_{C_p}} = \frac{1}{X_{C_1}} + \frac{1}{X_{C_2}} + \frac{1}{X_{C_3}} + \ldots$$

Bij spoelen in serie geldt voor de vervangings*reactantie* hetzelfde als bij condensators.



$$X_{X_s} = X_{L_1} + X_{L_2} + X_{L_3} + \ldots$$

Bij spoelen parallel geldt voor de vervangings*reactantie* hetzelfde als bij condensators.



$$\frac{1}{X_{L_p}} = \frac{1}{X_{L_1}} + \frac{1}{X_{L_2}} + \frac{1}{X_{L_3}} + \ldots$$

TEST UZELF

1. Twee weerstanden R_1 = 800 Ω en R_2 = 200 Ω staan parallel.

   De vervangingsweerstand bedraagt: R_p = [ ]

2. Twee condensators C_1 = 300 nF en C_2 = 200 nF staan parallel en zijn aangesloten op een sinusvormige wisselspanning van 10 mV - 10 kHz.

   C_p = [ ]

   De vervangingsreactantie van deze condensators bedraagt:

   X_{Cp} = [ ]

3. Twee spoelen L_1 = 10 mH en L_2 = 20 mH staan parallel en zijn aangesloten op een sinusvormige wisselspanning van 50 mV - 1 kHz.

   De vervangingszelfinductie is: L_p = [ ]

   De vervanginsreactantie van de spoelen bedraagt:

   X_{Lp} = [ ]

VECTORDIAGRAMMEN

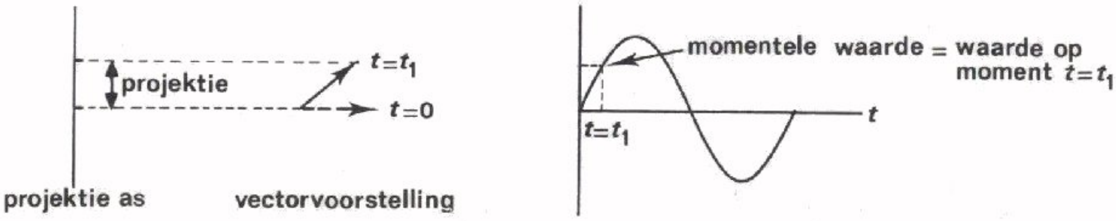
Om goed in te zien wat er met wisselspanningen en -stromen in een schakeling aan de hand is, tekent men een *vectordiagram*. Hierna volgen een aantal voorbeelden van schakelingen met hun vectordiagram.
Eerst enkele belangrijke opmerkingen:

Men begint bij een *serie*schakeling altijd met de *stroom*vector te tekenen. De stroom is immers voor alle componenten in een serieschakeling dezelfde.

Men begint bij een *parallel*schakeling altijd met de *spannings*vector te tekenen. De spanning is immers voor alle componenten in een parallelschakeling dezelfde.

De volgorde van de "spanningspijlen" in het schema is hetzelfde als die van de "spanningsvectors" in het vectordiagram.

Bedenk verder, dat de projectie van een vector op de projectie-as de momentele waarde voorstelt.



De wisselstroomweerstand $\frac{u}{i}$ van een schakeling die alleen uit L's of C's bestaat, wordt *reactantie* X genoemd.

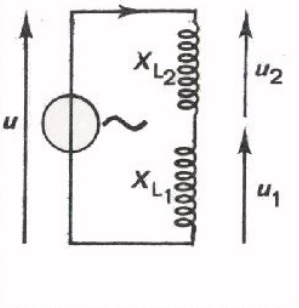
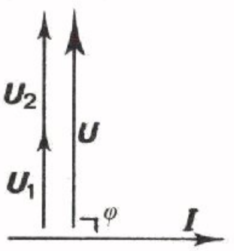
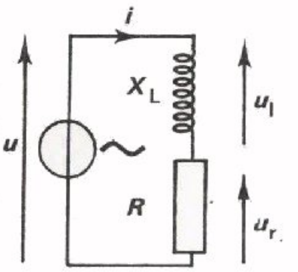
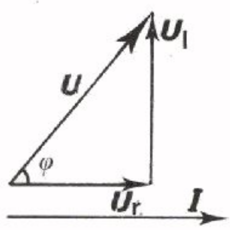
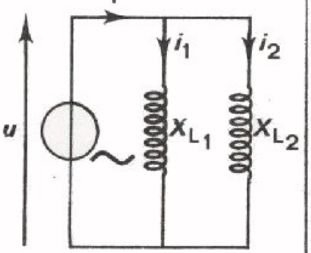
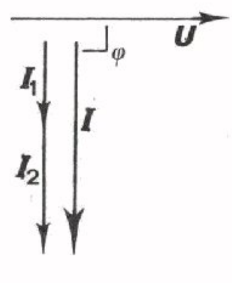
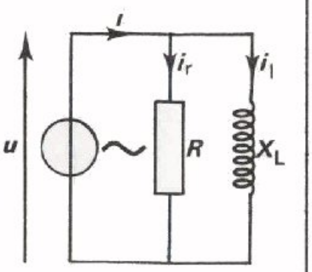
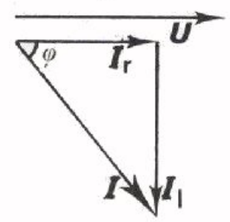
De reactantie van een spoel wordt aangegeven met: X_L.
Die van een condensator met: X_C.

Bestaat de schakeling uit een combinatie van R en L of van R en C, dan heet de wisselstroomweerstand *impedantie* Z.

Bestudeer nu aandachtig de volgende schakelingen van L's en R's. U *moet* alles wat op het volgend blad staat geheel *snappen*. Van buiten proberen te leren is zinloos. Hebt u het niet geheel door, vraag dan uw leraar om nadere uitleg.

Opmerking: Afzonderlijke wisselspanningen of -stromen geven wij aan door vectors met kleine pijlpunten;
somvectors van twee of meer spanningen of stromen tekenen wij met grote pijlpunten.

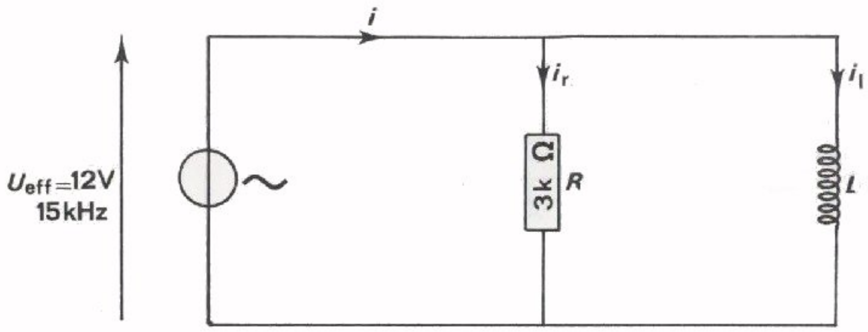
OVERZICHT VAN ENKELE SCHAKELINGEN

schakeling	vectordiagram	volgorde van tekenen	berekening van de wisselstroom-weerstand
	$\cos\varphi = \cos 90^0 = 0$ 	i u_1 u_2 u	$u = u_1 + u_2$ $X_{Ls}.i = X_{L_1}.i + X_{L_2}.i$ $X_{Ls} = X_{L_1} + X_{L_2}$ $= \frac{u}{i}$
	$\cos\varphi = \frac{u_R}{u}$ 	i u_R u_L u	$u^2 = u_R^2 + u_L^2$ $(Z_s.i)^2 = (R.i)^2+(X_L.i)^2$ $Z_s^2 = R^2 + X_L^2$ $Z_s = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ $= \frac{u}{i}$
	$\cos\varphi = \cos 90^0 = 0$ 	u i_1 i_2 i	$i = i_1 + i_2$ $\frac{u}{X_{Lp}} = \frac{u}{X_{L1}} + \frac{u}{X_{L2}}$ $\frac{1}{X_{Lp}} = \frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}}$ $= \frac{i}{u}$
	$\cos\varphi = \frac{i_R}{i}$ 	u i_R i_L i	$i^2 = i_R^2 + i_{XL}^2$ $(\frac{u}{Z_p})^2 = (\frac{1}{R})^2 + (\frac{1}{X_L})^2$ $(\frac{1}{Z_p})^2 = \frac{1}{R^2} \quad \frac{1}{X_L^2}$ $\frac{1}{Z_p} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}}$ $= \frac{i}{u}$

TEST UZELF

Gegeven is de volgende schakeling.

De spoel is ideaal en heeft bij 15 kHz een reactantie van 3 kΩ.



Gevraagd te bepalen: i_l, i_r, i en Z.

Bepaal bovendien door opmeting in het vectordiagram cos φ .

Oplossing:

i_l =

i_r =

i =

Z =

cos φ =

WISSELSTROOMVERMOGEN

Een schakeling bestaande uit *R*'s, *C*'s en *L*'s, aangesloten op een sinusvormige wisselspanning, neemt een vermogen op:

$$P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos\varphi$$

Aangezien $U_{eff} = \frac{U_t}{\sqrt{2}}$ en $I_{eff} = \frac{I_t}{\sqrt{2}}$, kunnen we dit ook schrijven als:

$$P = \frac{1}{2}\ U_t \cdot I_t \cdot \cos\varphi$$

- Bij een weerstand zijn stroom en spanning in fase. φ is dus gelijk aan 0 en $\cos\varphi = 1$.
  Voor een weerstand wordt de formule voor het vermogen dus:

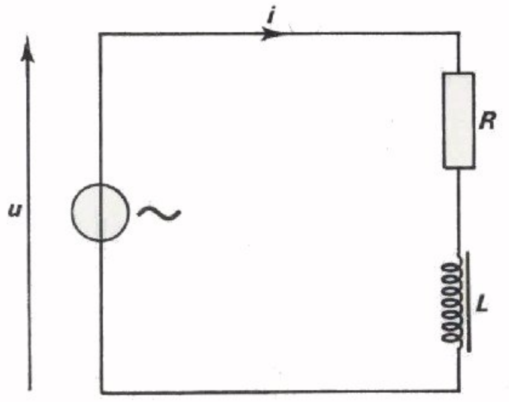
$$P = U_{eff} \cdot I_{eff} = \frac{1}{2}\ U_t \cdot I_t$$

- Bij een condensator en bij een spoel is de fasehoek tussen stroom en spanning $\varphi = 90^0$.
  $\cos\varphi = 0$.
  Gemiddeld wordt in een condensator en ook in een spoel *geen* vermogen ontwikkeld.

In een combinatie van *R*'s, *C*'s en *L*'s nemen de *R*'s *wel*, maar de *C*'s en *L*'s *geen* vermogen op.

TEST UZELF

1.



In deze schakeling is:

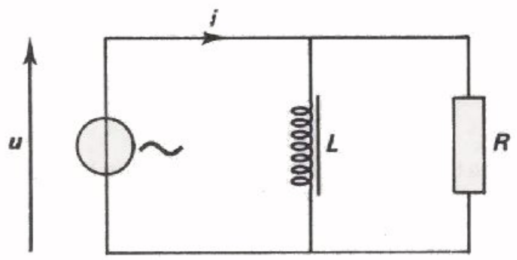
$U_t = 10$ V
$I_t = 10$ mA.

Stroom en spanning zijn 60^0 in fase verschoven.

Het door de schakeling opgenomen vermogen is:

$P =$ [ ] W

2.



In deze schakeling geldt:

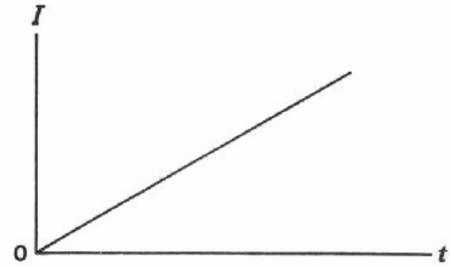
$U_{eff} = 1$ V
$f = \frac{1}{2\pi}$ kHz ($\approx$ 160 Hz)
$R = 100\ \Omega$
$L = 10$ mH.

Het in deze schakeling opgenomen vermogen is:

$P =$ [ ] W

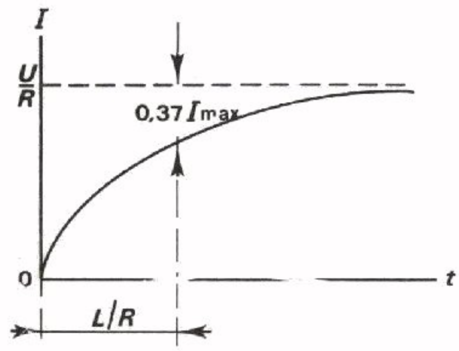
IN- EN UITSCHAKELEN VAN DE STROOM BIJ EEN SPOEL

- Sluit men een gelijkspanning aan op een *ideale* spoel, dan neemt de stroom lineair toe.



- Sluit men een gelijkspanning aan op een serieschakeling van een weerstand en een spoel, of een *niet ideale* spoel, dan groeit de stroom door de spoel minder dan lineair aan.

$$I_{max} = \frac{U}{R}$$



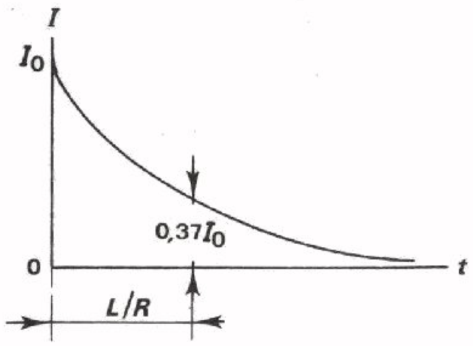
Het toenemen van de stroom geschiedt langzamer:
- naarmate de L groter is,
- naarmate de R kleiner is.

De stroom neemt tot (100 - 37)% van zijn eindwaarde I_{max} toe in $\frac{L}{R}$ seconden, indien L in H en R in Ω wordt ingevuld.

Deze "$\frac{L}{R}$-tijd" van een spoel met weerstand vertoont veel overeenkomst met de "*RC*-tijd" van een condensator met weerstand.

- Sluit men een stroomvoerende *R*-*L*-schakeling plotseling kort, dan neemt de stroom in de spoel minder dan lineair af.

  In de $\frac{L}{R}$-tijd neemt de stroom af tot 37% van zijn beginwaarde I_0.



- Men mag een stroomvoerende spoel nooit plotseling "open" schakelen omdat:
  - de dan optredende grote zelfinductiespanning doorslag van de winding-isolatie kan veroorzaken,
  - het optreden van vonken tussen de contacten van de schakelaar deze contacten op den duur doet inbranden.

NAAM: [ ] KLAS: [ ]

OEFENING

De spoel van 15 H heeft een koperdraadweerstand van 100 Ω.
Hoe groot is de waarde I_{max}, die de stroom op den duur zal krijgen als een spanning van 45 V op de spoel wordt aangesloten?

I_{max} = [ ]

Hoe groot is de $\frac{L}{R}$ tijd? $\frac{L}{R}$ = [ ]

Als men de maximaal te bereiken waarde van de stroom wil beperken tot 150 mA, hoe groot is dan de weerstand die men in serie met de spoel moet schakelen?

R_s = [ ]

Hoeveel vermogen wordt er dan op den duur aan deze serieweerstand toegevoerd?

P = [ ]

Hoe groot is nu de $\frac{L}{R}$ tijd van de schakeling?

$\frac{L}{R}$ = [ ]

Door R_s in serie te schakelen is de $\frac{L}{R}$ tijd dus **vergroot/verkleind**

B 122

TOEPASSINGEN VAN SPOELEN

INLEIDING

In de vorige les is nog eens herhaald wat we in het A-deel van de cursus hebben behandeld van spoelen.
In deze les laten we een aantal praktische toepassingen van spoelen de revue passeren. We behandelen achtereenvolgens:

- De laagfrequent smoorspoel.
- De hoogfrequent smoorspoel.
- De spoel als elektromagneet.
- De resonantiekring.
- De zaagtandstroomgenerator.
- Het opwekken van piekspanningen.
- De transformator.

DE LF - SMOORSPOEL

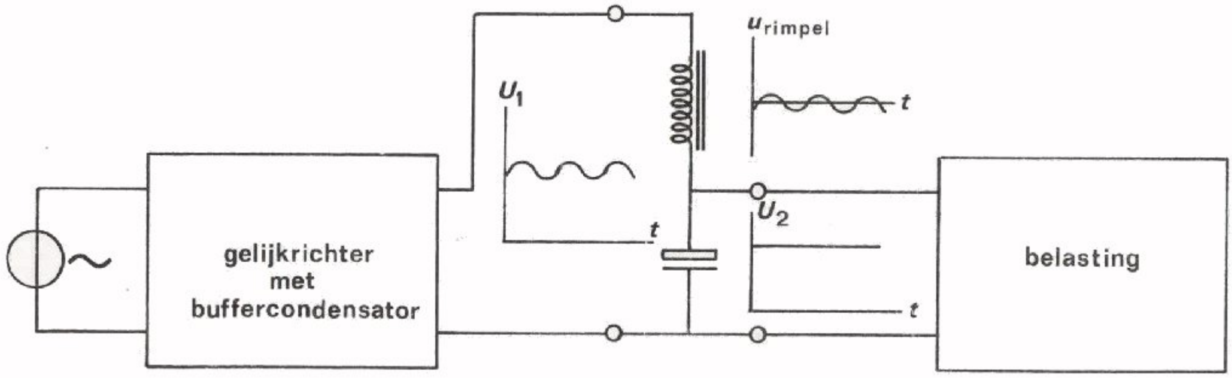
Een spoel met grote zelfinductie vormt bij lage frequenties een grote reactantie (wisselstroomweerstand). Voor gelijkstroom vormt hij nagenoeg een kortsluiting.
Voorbeeld:

Stel $L = 10$ H.
Voor wisselstroom bij $f = 50$ Hz geldt:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$
$$= 2\pi.50.10 \approx 3000\ \Omega$$

Voor gelijkstroom hebben we alleen te maken met de koperweerstand van de spoelwindingen en die bedraagt 50 à 200 Ω.

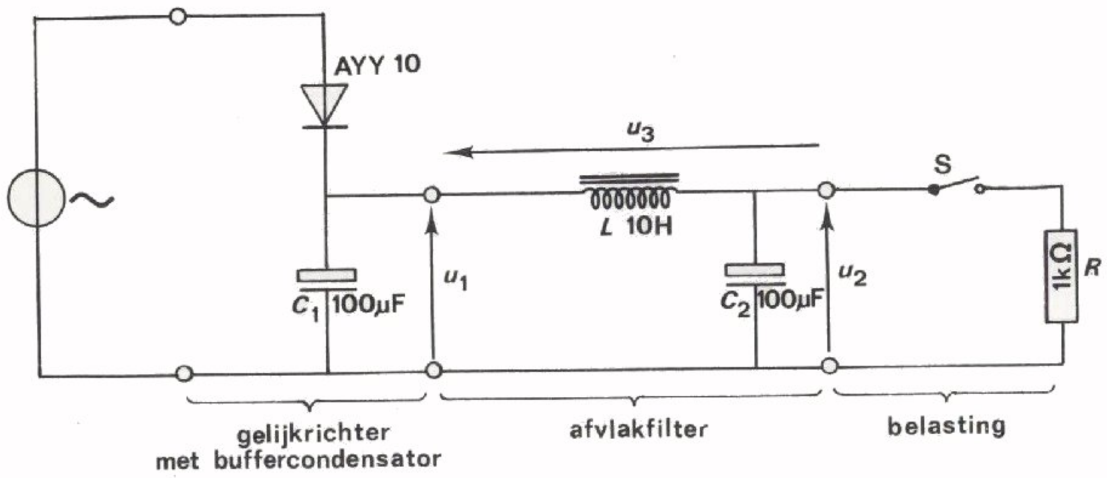
Hiervan kan men een nuttig gebruik maken als men een enigszins pulserende gelijkspanning moet omzetten in een nagenoeg constante gelijkspanning. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een gelijkrichter. Deze levert als hij belast wordt een gelijkspanning waarop zich ook nog een rimpelspanning bevindt.
Door middel van een zogenaamd afvlakfilter onderdrukt men deze ongewenste rimpelspanning. Dit filter bevat een spoel met een grote L die de rimpelspanning als het ware "smoort"; vandaar de naam *LF-smoorspoel*



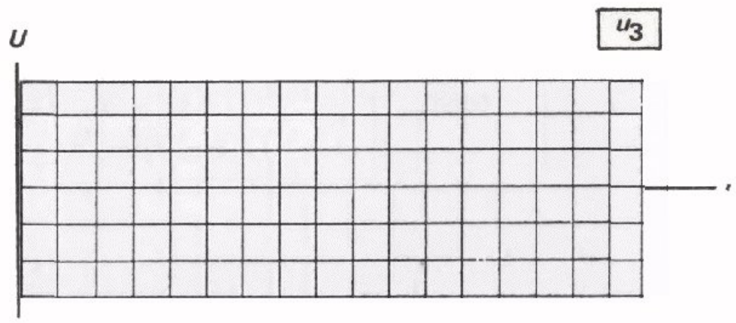
In het afvlakfilter combineert men de spoel meestal met een condensator die bij de toegepaste frequentie een veel kleinere reactantie heeft dan de smoorspoel. De rimpelspanning u_{rimpel} komt bijna geheel over de smoorspoel te staan, terwijl de vrijwel zuivere gelijkspanning U_2 over de belasting staat.

In de volgende opdracht gaan we dit ervaren.

OPDRACHT: AFVLAKKING VAN EEN GELIJKGERICHTE SPANNING.



- Bouw deze schakeling.
- Voer een wisselspanning toe U_{eff} = 10 V, 50 Hz.
- Maak U_1 op het scherm van de oscilloscoop zichtbaar. Dit zowel met S open (onbelast), als met S dicht (belast).
- U ziet dat U_1 onbelast een zuivere gelijkspanning is. door het belasten ontstaat er een rimpelspanning. Bekijk deze eens goed met de oscilloscoop in stand AC. Teken zijn vorm hieronder.



- Maak nu in de belaste toestand de spanning U_2 over C_2 zichtbaar en daarna de spanning over de smoorspoel.
- U ziet dat de rimpelspanning over de smoorspoel komt te staan, zodat over de belasting een bijna zuivere gelijkspanning overblijft.

DE HF-SMOORSPOEL

Een spoel met een kleine zelfinductie heeft bij hoge frequenties een grote reactantie en bij lage frequenties een kleine.
Voorbeeld:

Stel $L = 10$ mH

bij $f = 10$ MHz geldt:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L = 2\pi . 10^7 . 10 . 10^{-3} \approx 630 \text{ k}\Omega$$

Bij $f = 1$ kHz geldt:

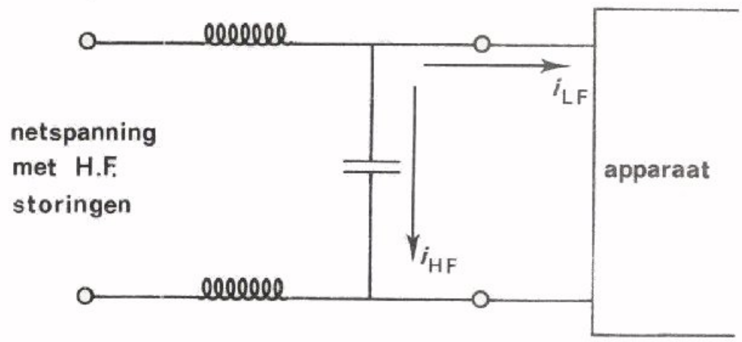
$$X_L = 2\pi . 10^3 . 10 . 10^{-3} \approx 63 \ \Omega.$$

Bij hoge frequenties bezit deze spoel een grote wisselstroomweerstand en bij lage frequenties is hij vrijwel een kortsluiting voor wisselstroom. Hiervan kan men gebruik maken als men tussen twee punten van een schakeling een LF-kortsluiting moet maken zonder deze punten ook voor HF kort te sluiten. Men zegt dat de spoel dan dienst doet als HF-*smoorspoel*.

Voorbeeld.

Een apparaat dat gevoelig is voor HF-storingen wordt aangesloten op het lichtnet. Nu bevat het lichtnet altijd HF-storingen en die mogen niet tot zo'n apparaat doordringen.
Men voert de netspanning nu toe via twee HF-smoorspoelen en een voor hoge frequenties geschikte afvlakcondensator. Men kiest de waarden van de L's en de C zó, dat voor HF-storingen geldt:

$$\omega L >> \frac{1}{\omega C}$$



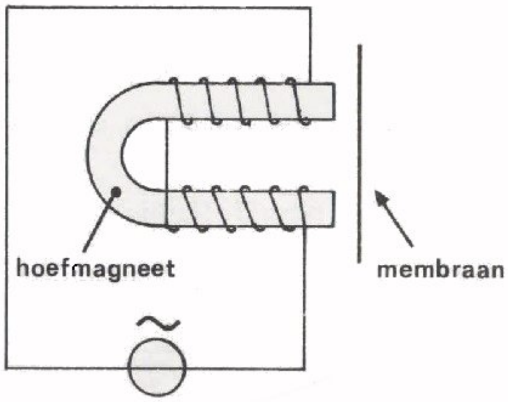
Voor 50 Hz is ωL zo klein dat er nauwelijks netspanningsverlies over de L's optreedt. Bovendien is $\frac{1}{\omega C}$ bij 50 Hz zo hoog, dat er praktisch geen stroomverlies is door de condensator.

De HF-stoorspanningen echter staan nagenoeg geheel over de HF-smoorspoelen.

DE ELEKTROMAGNEET

Als men een spoel van een ijzeren kern voorziet, verkrijgt men een elektromagneet. Deze trekt ander ijzer aan zodra er een stroom door de spoel wordt gestuurd. Wordt de stroom onderbroken, dan verliest hij zijn aantrekkende werking grotendeels weer. Hiervan maakt men gebruik in bijvoorbeeld *relais*.

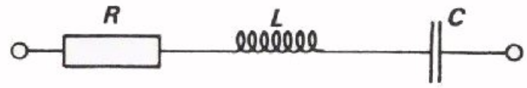
Wordt de stroom in de spoel van een elektromagneet gevarieerd, dan varieert ook de kracht die uitgeoefend wordt op het ijzer in de buurt. Hiervan wordt bijvoorbeeld gebruik gemaakt in de *hoofdtelefoon*. Daarin bevindt zich een hoefmagneetje dat voorzien is van een spoeltje.
Vlak voor het magneetje is een dun ijzeren plaatje (membraan) opgesteld.
Als er nu een wisselstroompje in het ritme van een, of ander geluid door het spoeltje loopt, dan wisselt de aantrekkende kracht op het membraan in hetzelfde ritme.
Het membraan gaat op zijn beurt in het ritme van het oorspronkelijk geluid trillen en maakt daardoor deze trilling hoorbaar.



RESONANTIEKRINGEN

Een belangrijke toepassing vindt de spoel samen met een condensator als resonantiekring.
We kennen twee soorten resonantiekringen.

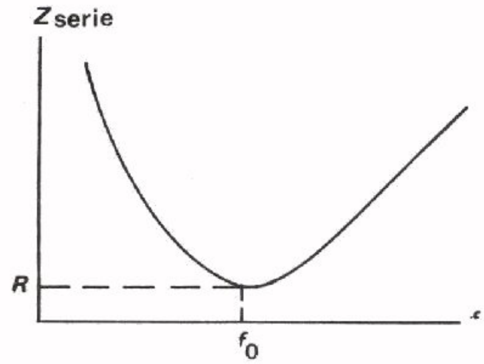
- *De seriekring*



De resonantiefrequentie

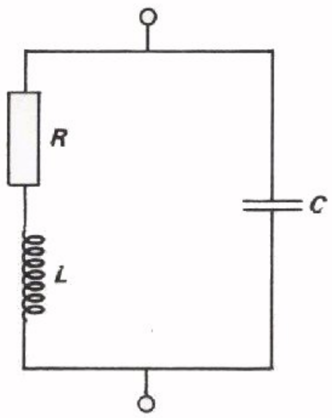
$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

Bij deze frequentie is de impedantie Z_o minimaal en klein.
Hij is gelijk aan R.



Opmerking: Weerstand R is niet apart aangebracht, maar vertegenwoordigt de ohmse weerstand van de spoel.

- *De parallelkring*



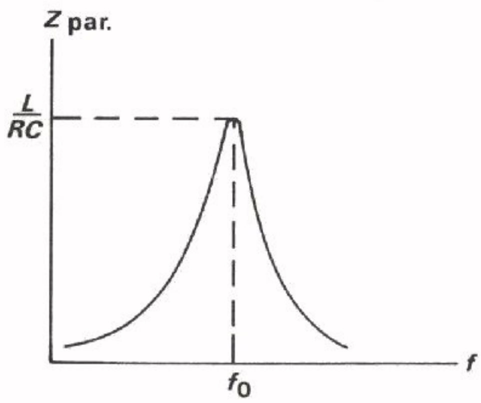
De resonantiefrequentie is eveneens:

$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

Bij deze frequentie is de impedantie Z_o maximaal en zeer groot.
Hij is gelijk aan:

$$Z_o = \frac{L}{RC}.$$

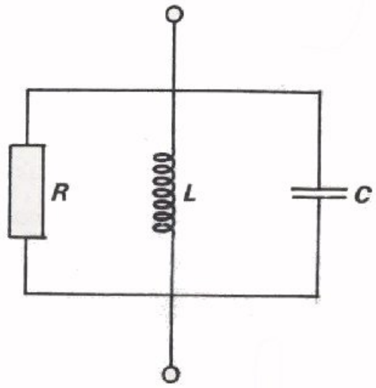
Opmerking: Ook nu is R niet apart aangebracht, maar vertegenwoordigt hij de ohmse weerstand van de spoel.



De resonantiekringen vormen banddoorlatende of bandsperrende filters. Dit eventueel in combinatie met andere componenten, zoals R's, C's of L's. Dat hebben we in het A-deel gezien.

OEFENINGEN

1.



L = 1 mH

C = 4 nF

R = 10 kΩ

Bepaal ω_o, f_o, $\omega_o L$ en Z_o

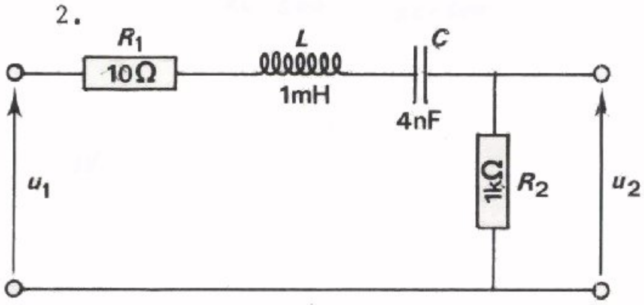
ω_o = [rad/s]

f_o = [Hz]

$\omega_o L$ = [Ω]

Z_o = [Ω]

2.



Dit is een

band [**sperrend/doorlatend**]

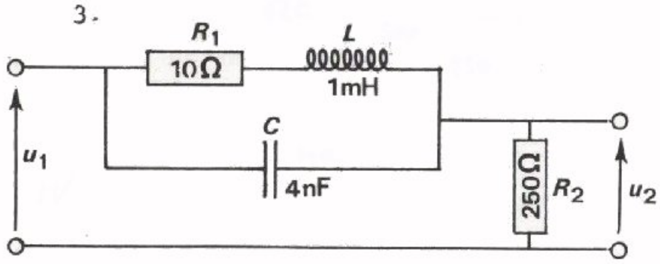
filter.

Stel dat $U_{1(eff)}$ = 1 V en $\omega = 5.10^5$ rad/s.

Dan is $U_{2(eff)}$ ongeveer gelijk aan

$U_{2(eff)}$ = [ ]

3.



Dit is een

band [**sperrend/doorlatend**]

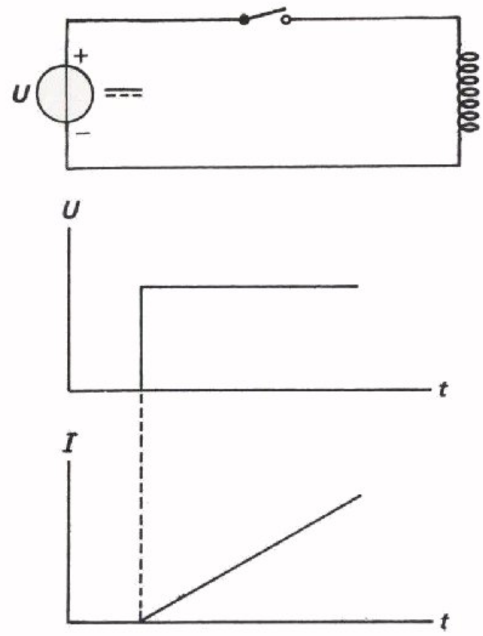
filter.

Stel dat $U_{1(eff)}$ = 1 V en $\omega = 5.10^5$ rad/s.

Dan is $U_{2(eff)}$ ongeveer gelijk aan

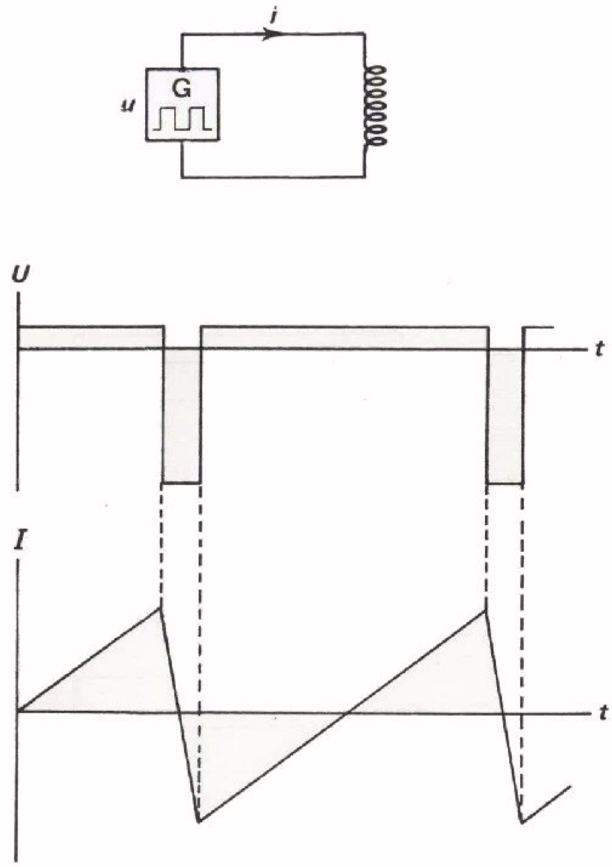
$U_{2(eff)}$ = [ ]

DE ZAAGTANDSTROOM-GENERATOR



Sluit men op een ideale spoel een gelijkspanning aan, dan neemt de spoelstroom lineair toe.

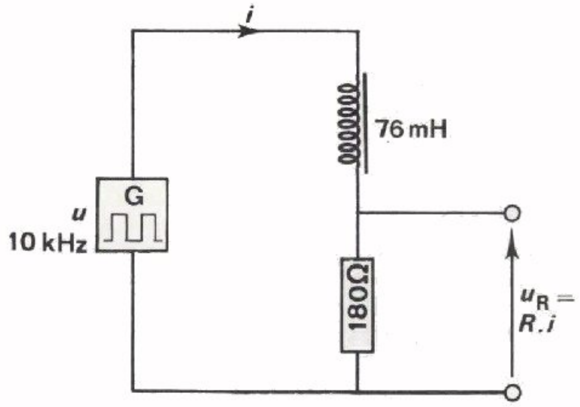
Hiervan kan men gebruik maken bij het opwekken van een zaagtand*stroom*. Dit gebeurt o.a. in elke TV-ontvanger, waarin een zaagtandstroom door de zogenaamde afbuigspoelen moet lopen. Deze afbuigspoelen dienen om de elektronenstraal in de beeldbuis af te laten buigen.



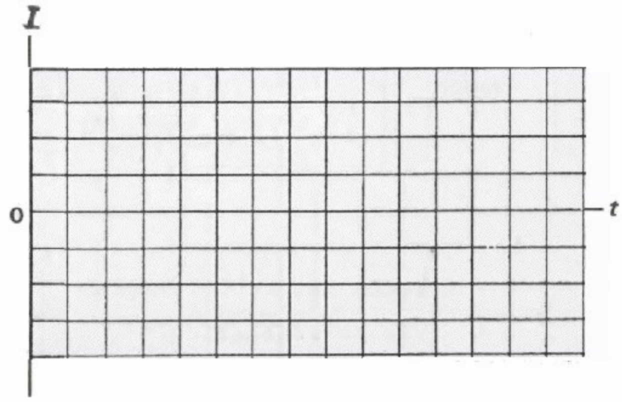
Hiernaast is het principe van het opwekken van een zaagtandstroom door een spoel weergegeven. Er wordt een assymmetrische blokspanning toegevoerd. Tijdens de kleine positieve spanning neemt de stroom lineair langzaam toe. Tijdens de grote negatieve spanning neemt de stroom snel lineair af.

In een opdracht gaan we nog eens het opwekken van een driehoekstroom met behulp van een symmetrische blokspanning ervaren.

OPDRACHT: OPWEKKING VAN EEN DRIEHOEK-STROOM.



- Bouw deze schakeling.
- Voer een blokspanning toe met een topwaarde van 1 V en f = 10 kHz.
- Maak de spanning over de R zichtbaar op het scherm van een oscilloscoop.
- De spanning $u_R = R.i$ verloopt net zo als de stroom door de spoel. U ziet dat de stroom inderdaad driehoek-vormig loopt.
- Verlaag f tot 1 kHz en teken hieronder hoe i dan verloopt.



- Waarom verloopt i nu niet meer driehoek-vormig?

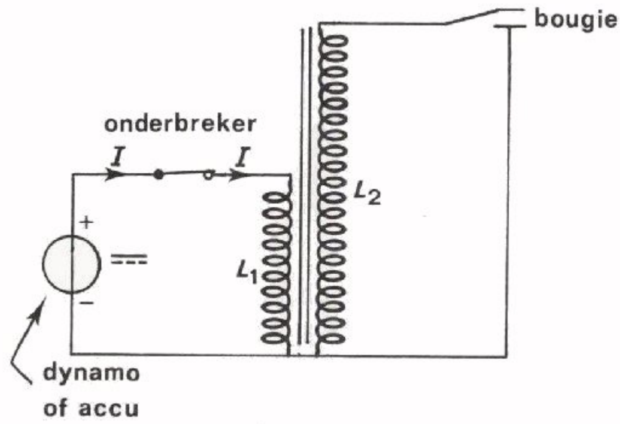
HET OPWEKKEN VAN HOGE PIEKSPANNINGEN

Als men een spoel koppelt met een veranderend magnetisch veld, wordt er een inductiespanning in de spoel opgewekt. Deze inductiespanning is des te groter naarmate:

- de spoel meer windingen heeft.
- het gekoppelde magnetisch veld sneller wisselt.

Hiervan maakt men gebruik om zeer hoge spanningspieken op te wekken. Het veranderende magneetveld is daarbij vaak niet afkomstig van een buiten de spoel opgestelde magneet, maar is het magneetveld van de spoel zelf die stroom voert. Door deze stroom plotseling te onderbreken, valt het magneetveld van de spoel zelf zeer snel weg, waardoor in de spoel een zeer hoge inductiespanning wordt opgewekt. Dit is dus eigenlijk een *zelf*inductiespanning.

- Een eerste voorbeeld uit het dagelijks leven is de bobine in auto's. De accu of dynamo voert daarbij via onderbrekerkontakten stroom toe aan een spoel L_1. Hierdoor ontstaat een magnetisch veld dat gekoppeld is met spoel L_2 die zeer veel windingen heeft. Telkens als S onderbroken wordt, valt de stroom I en ook het magnetisch veld weg. Daardoor wordt in spoel L_2 een zeer hoge spanning opgewekt die bij de bougie een vonk doet overslaan. De inductiespanning is zo hoog, omdat:



- de spoel L_2 zoveel windingen heeft.
- het magnetisch veld zeer snel wegvalt.

- Een tweede voorbeeld van het opwekken van hoge piekspanningen treffen we aan in de TV-ontvanger.

  Voor de beeldbuis heeft men een voedingsspanning nodig van 15 kV of nog meer. Deze verkrijgt men als volgt:

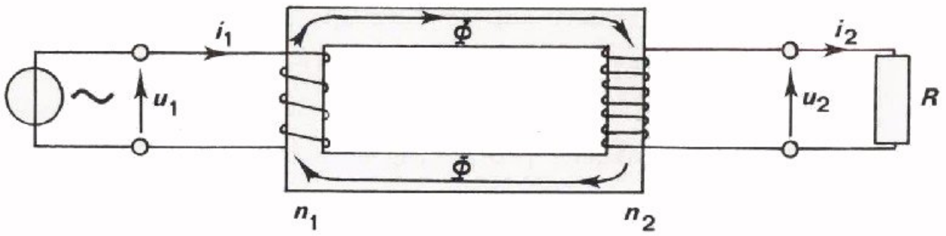
  In een spoel laat men telkens een grote stroom ontstaan die via een buis of een transistor wordt toegevoerd. Door deze stroom plotseling te onderbreken, wordt er telkens een zeer hoge piekspanning in de spoel opgewekt. Het onderbreken gebeurt door de stuurspanning van de buis of transistor telkens plotseling te veranderen.

  De zo opgewekte reeks van zeer hoge spanningspieken wordt met behulp van een gelijkrichtdiode en een afvlakfilter tenslotte omgezet in een hoge gelijkspanning.

  Opmerking: De hier genoemde telkens aangroeiende stroom is een van de zaagtandstromen, die voor de afbuiging van de elektronenstraal in de beeldbuis nodig zijn. Deze zaagtandstroom is eerder op blad B122.8 ter sprake gekomen.

DE TRANSFORMATOR

Een transformator is in wezen niets anders dan twee magnetisch gekoppelde spoelen. Magnetisch gekoppeld wil zeggen dat de twee spoelen een gemeenschappelijk magnetisch veld hebben.
De werking is als volgt:



Voert men aan de ene wikkeling (de primaire) een wisselspanning u_1 toe, dan loopt er een wisselende stroom i_1 in deze wikkeling. Deze i_1 veroorzaakt een wisselende magnetische flux Φ. Deze flux is ook gekoppeld met de tweede wikkeling (de secundaire). De wisselende flux induceert in de secundaire wikkeling een wisselspanning u_2. Bij belasting met een weerstand R gaat dan door die R een wisselstroom i_2 lopen.
Schematisch samengevat:

$$u_1 \longrightarrow i_1 \longrightarrow \Phi \longrightarrow u_2 \longrightarrow i_2 \text{ door } R.$$

Aangezien de "wisselspanning per winding" in de primaire en secundaire wikkeling even groot zijn, verhouden deze spanningen zich als de aantallen windingen.

$$u_1 : u_2 = n_1 : n_2$$

of:

$$\boxed{\frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{n_2}}$$

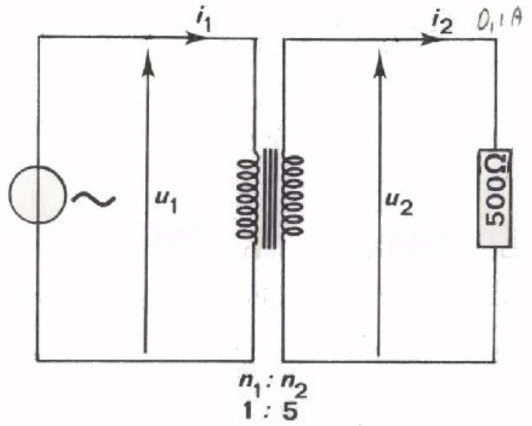
u_1 = spanning primair
u_2 = spanning secundair
n_1 = aantal windingen primair
n_2 = aantal windingen secundair.

Door middel van een transformator kan men een gegeven wisselspanning u_1 dus omzetten (transformeren) in een grotere of kleinere wisselspanning u_2 door n_2 groter of kleiner te kiezen dan n_1.

In de volgende les komen we uitgebreid op de transformator terug.

OEFENINGEN

1.



Bij deze transformator is de primaire spanning 10 V. Bereken nu de secundaire spanning u_2.

$U_{2(eff)}$ = ☐

In deze les is het volgende nog niet ter sprake gebracht, maar U herinnert het zich waarschijnlijk nog wel uit het A-deel van de cursus.
Hoe groot is de primaire stroom?

$I_{1(eff)}$ = ☐

2. Waarom kan men met een transformator geen gelijkspanning transformeren?

SAMENVATTING

Toepassingen van spoelen zijn:

- Een LF-smoorspoel is een spoel met grote zelfinductie (b.v. 10 H). Hij vormt voor gelijkstroom vrijwel een kortsluiting, voor LF-wisselstroom echter een grote reactantie.

- Een HF-smoorspoel is een spoel met kleine zelfinductie (b.v. 10 mH). Hij vormt voor LF-wisselstroom vrijwel een kortsluiting, maar heeft voor HF-wisselstroom een grote reactantie.

- Van een ijzerkern voorzien vormt een spoel een elektromagneet, waarmee men ijzer kan aantrekken.

- Tezamen met een condensator vormt een spoel een resonantiekring.

  Als seriekring heeft deze bij resonantie een zeer kleine impedantie en daarbuiten een veel grotere.

  Als parallelkring heeft hij bij resonantie een grote impedantie en daarbuiten een veel kleinere.

- Door een asymmetrische blokspanning op een spoel aan te sluiten, kan een zaagtand*stroom* worden opgewekt.

- Door de spoelstroom telkens plotseling te onderbreken kan men hoge piekspanningen opwekken.

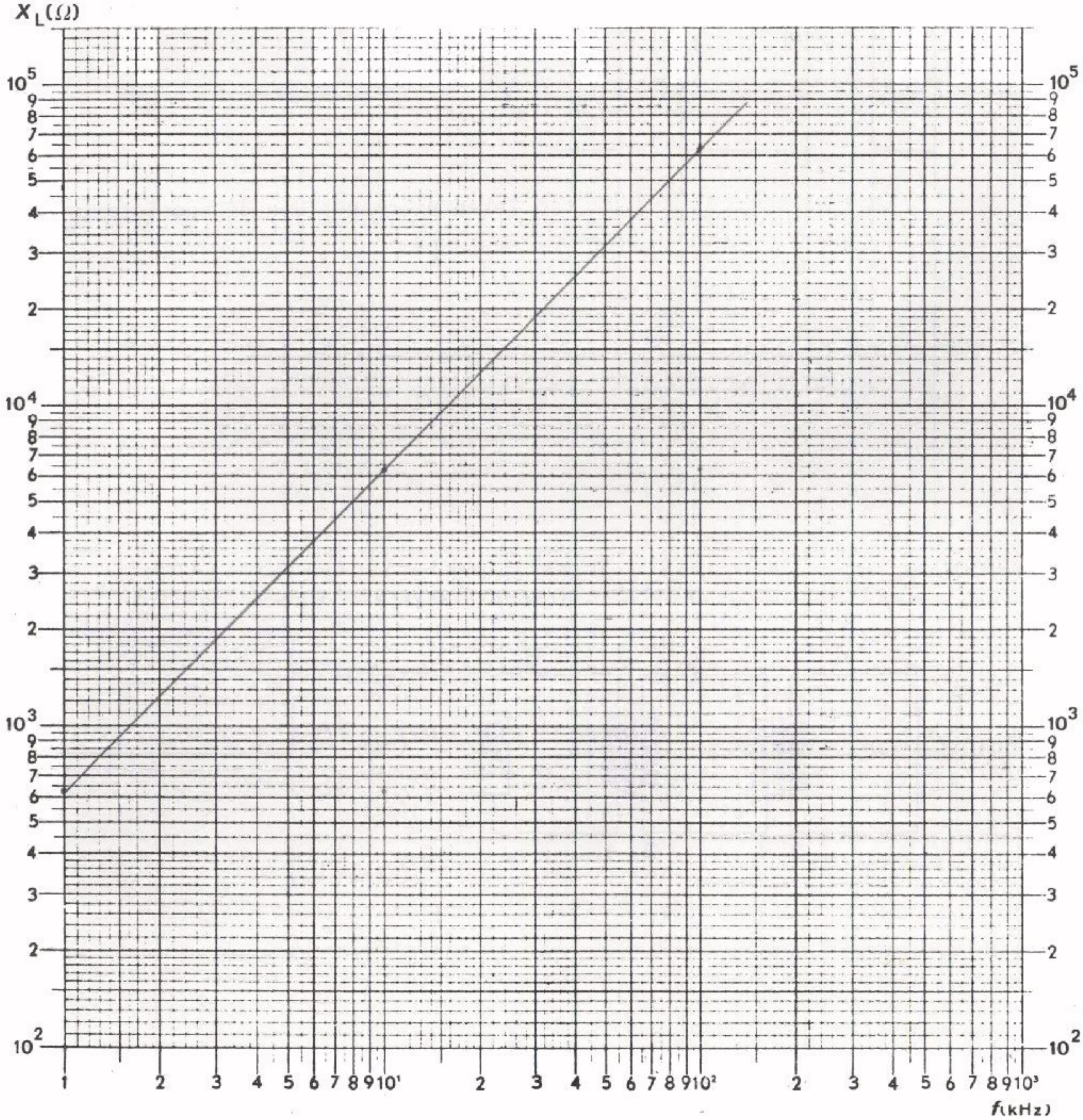
- Door twee spoelen magnetisch te koppelen verkrijgt men een transformator. Deze is te gebruiken om een gegeven wisselspanning u_1 in een grotere of kleinere wisselspanning u_2 om te zetten.

NAAM:

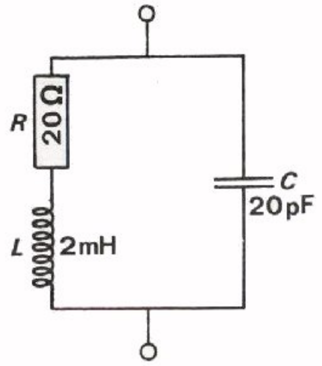
KLAS:

OEFENINGEN

1. Bereken de reactantie van een spoel met een zelfinductie L = 100 mH bij 1 kHz, 10 kHz en 100 kHz.
   Zet de gevonden waarden uit in onderstaande grafiek en verbind de punten door een lijn.



2.



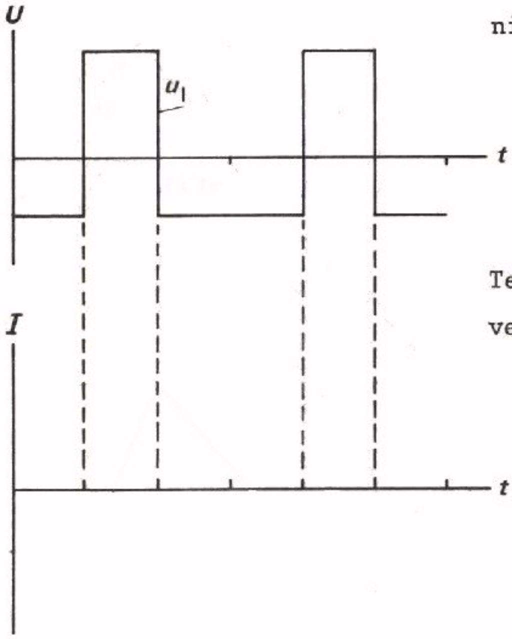
Bepaal de resonantiefrequentie van deze kring.

f_o =

Bepaal ook de maximale impedantie:

Z_o =

3.

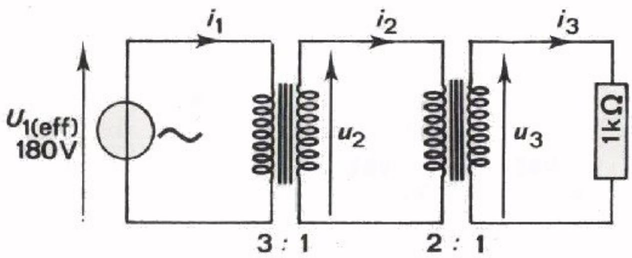


Aan een ideale spoel voert men de spanning u toe.

Teken hiernaast hoe de spoelstroom i_L verloopt.

4.

Bereken $U_{2(eff)}$, $U_{3(eff)}$, $I_{3(eff)}$, $I_{2(eff)}$ en $I_{1(eff)}$.



$U_{2(eff)}$ =

$U_{3(eff)}$ =

$I_{3(eff)}$ =

$I_{2(eff)}$ =

$I_{1(eff)}$ =

B 123

DE COMPONENT "SPOEL"

INLEIDING

Na een herhaling van enige theorie in les B121 en een behandeling van de toepassingen van de spoel in les B122, gaan we nu naar de component "spoel" zelf kijken.

DE SPOEL EN ZIJN ZELFINDUCTIE

Als er door een spoel een wisselstroom loopt, ontstaat er in die spoel een magnetisch veld Φ dat voortdurend van sterkte wisselt. Dit veld is met de spoel zelf gekoppeld en wekt een zelfinductiespanning op die zijn oorzaak (de stroom) tegenwerkt.
Dat de wisselstroom wordt tegengewerkt, merken we hieraan, dat de spoel een wisselstroomweerstand $X_L = \omega L$ blijkt te bezitten.

In de uitdrukking $X_L = \omega L = 2\pi f L$ komt de frequentie voor. Dit verbaast ons niet, want hoe hoger de frequentie is, des te sneller verandert Φ en des te groter is de opgewekte zelfinductiespanning. Des te groter is dan ook de tegenwerking (weerstand) die door deze spanning aan de wisselstroom geboden wordt.

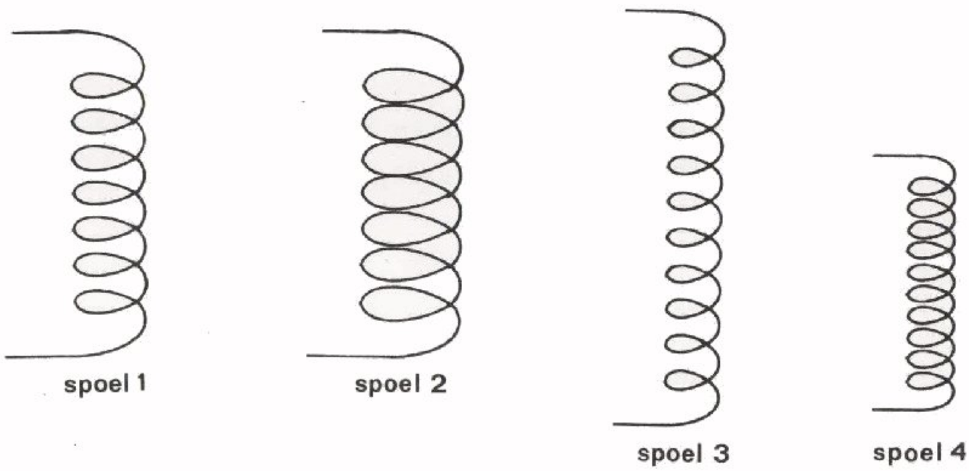
Verder komt de zelf inductie L voor in de uitdrukking voor X_L. Deze zelfinductie is een eigenschap van de spoel zelf. Hij wordt bepaald door de grootte van het opgewekte veld bij een bepaalde stroom i. Hoe groter het eigen magnetische veld is, des te groter is de zelfinductie L.

WAAR HANGT L VANAF?

De grootte van de zelfinductie L van een spoel wordt bepaald door:

- Het aantal windingen van de spoel.
  Naarmate het aantal windingen bij overigens gelijke spoellengte groter is, is het opgewekte magnetische veld groter. Dus hoe meer windingen over dezelfde wikkelbreedte, des te groter L.

- De afmetingen van de spoel.
  Een dikkere spoel 2 die even lang is en even veel windingen heeft als spoel 1, heeft een groter magnetisch veld en daarom een grotere zelfinductie.
  Een korte spoel 4 die even dik is en net zoveel windingen heeft als spoel 3, heeft een groter magnetisch veld en daarom een grotere zelfinductie.



- Het materiaal.
  In spoelen brengt men vaak een kern aan van magnetiseerbaar materiaal. De aard, de vorm en de afmetingen van dit kernmateriaal bepalen in welke mate het magnetische veld en dus ook de zelfinductie wordt vergroot.

De grootte van de zelfinductie L hangt dus af van:

- het aantal windingen en de wijze waarop deze windingen zijn aangebracht.
- het soort kernmateriaal en de afmetingen van de kern.

Op de volgende bladen gaan we op deze punten nader in.

DE WIKKELDRAAD

Voor het wikkelen van spoelen gebruikt men zeer verschillende soorten draad. De verschillen zitten in de geleider zelf en in de aangebrachte isolatie.

Men gebruikt:

- *massief koperdraad*

  Hierop is steeds een isolerende laklaag (zogenaamde "posijnlak") aangebracht.

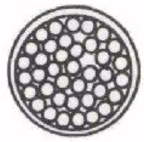
  Soms is er bovendien nog een omspinning met zijden draad aanwezig. Soms ook is de draad voorzien van een lijmlaag, die door verhitten vloeibaar gemaakt kan worden.



- *litze draad*

  Deze bestaat uit een streng van vele dunne, onderling geïsoleerde koperdraadjes.

  De gehele streng is meestal met zijde omsponnen.



  De streng is zo in elkaar gewonden, dat elk draadje dan weer in het hart van de streng en dan weer aan de buitenkant loopt. Door deze konstruktie heeft men bij hoge frequenties geen last van het zogenaamde *skineffect*.

Wat verstaat men onder het skineffect?

Als een wisselstroom van lage frequentie door een koperen draad loopt, dan benut die stroom het gehele oppervlak van de doorsnede van de draad. Voert men de frequentie van de wisselstroom op, dan doet zich het merkwaardig feit voor dat de stroom steeds meer aan het oppervlak (de huid = "skin") van de draad gaat lopen. Dit nu noemt men het huid- of skineffect. Doordat een HF-wisselstroom niet de gehele doorsnede van de draad benut, neemt de weerstand van een draad bij hogere frequenties toe en dit geeft nadelige verliezen.

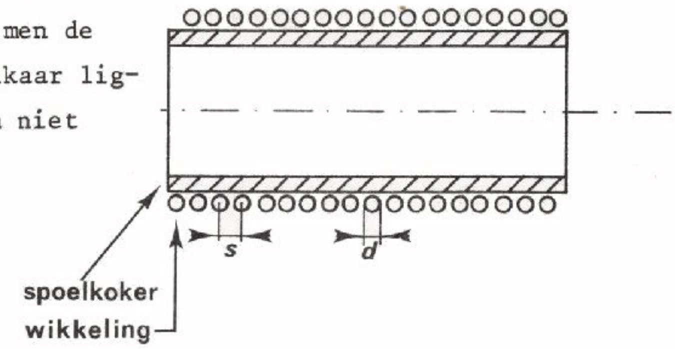
Door de boven beschreven konstruktie van litzedraad vermindert men het skineffect en daarmee de verliezen aanzienlijk.

Bij het solderen van litzedraad moet men er voor zorgen dat bij het begin en het eind van de draad de afzonderlijke adertjes goed kontakt maken. Bij litzedraad is de isolerende lak zo gekozen dat deze bij een soldeer temperatuur van circa 400°C vanzelf op zij gaat voor het soldeer (posijnlak).

VERSCHILLENDE METHODEN VAN WIKKELEN

De windingen kan men op verschillende manieren aanbrengen.

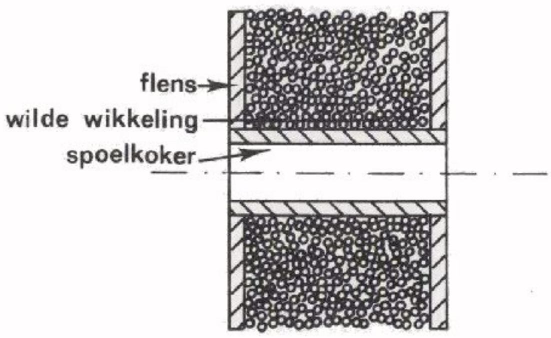
1. CYLINDRISCHE wikkeling. Dit is een wikkeling van één laag. Daarbij is de wikkelspoed s gelijk aan de draaddiameter d. Onder de "wikkelspoed" verstaat men de hartafstand tussen twee *naast* elkaar liggende draden; de draden behoeven niet *tegen* elkaar te liggen.



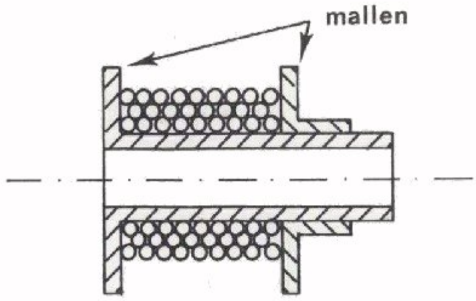
2. Een SEMI-BANK- wikkeling is een soort cylindrische wikkeling waarbij de wikkelspoed s kleiner is dan d. Is bijvoorbeeld $s = \frac{1}{2} d$, dan verkrijgt men een spoel die gemiddeld uit twee lagen is opgebouwd. Tijdens het wikkelen wordt de wikkeldraad door de wikkelmachine in één keer regelmatig bewogen van begin naar eind van de spoelkoker. Meer dan gemiddeld drie lagen ($s = \frac{1}{3} d$) laat men niet toe.

3. Een *hoogkant* geslingerde wikkeling levert een spoel op die uit meer dan drie lagen is samengesteld zonder dat de spoelkoker van flenzen is voorzien. De wikkeldraad is met zijde omsponnen om wegglijden van de windingen te voorkomen. Tijdens het wikkelen laat men de wikkeldraad een slingerbeweging maken waardoor de draden van de opeenvolgende lagen schuin over elkaar komen te liggen. De wikkelhoogte kan ongeveer net zo groot worden als de wikkelbreedte.

4. Een *wilde* wikkeling is een zonder regelmaat tussen twee flenzen gewikkelde spoel. Hiervoor kan men draad gebruiken die alleen van posijnlak is voorzien.



5. Een *orthocyclische* wikkeling is een volkomen regelmatige wikkeling die tussen twee mallen geschiedt. Deze mallen worden na de vervaardiging van de spoel verwijderd.



Op de draad waarmee men wikkelt is "plaklak" aangebracht. Na wikkeling brengt men de spoel op een hogere temperatuur waardoor de plaklak week wordt en de wikkelingen tot één geheel aan elkaar plakken.

De gewikkelde draad wordt precies loodrecht op de wikkelas gehouden. Telkens wordt een "ring" gesloten en vervolgens wordt de draad opzij bewogen zodat een nieuwe "ring" gewikkeld kan worden.
De windingen van de tweede en volgende lagen worden in de holtes tussen de windingen van de onderliggende laag gelegd.

De verhitting kan op verschillende manieren gebeuren:

- Men kan de gewikkelde spoel in een oven op de vereiste temperatuur brengen.
- Men kan een elektrische stroom door de spoel sturen die hem op de vereiste temperatuur brengt.

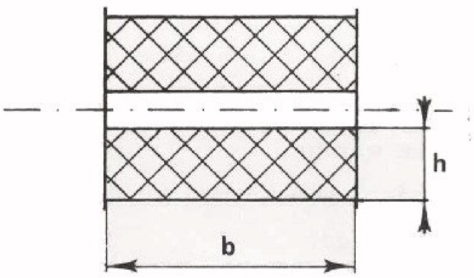
EIGENSCHAPPEN BIJ VERSCHILLENDE WIKKELINGEN

Als voornaamste eigenschappen noemen we:

- *De vulfaktor.*

  Meestal heeft men maar een beperkte ruimte voor de wikkeling ter beschikking. Vaak is het zaak deze ruimte zo goed mogelijk op te vullen met draadwindingen. Een maat voor de vulling van de wikkelruimte is de zogenaamde vulfaktor:

  $$v = \frac{n \cdot A}{b \cdot h}$$



n = aantal windingen.

A = oppervlakte van de doorsnede van de draad.

b = wikkelbreedte.

h = wikkelhoogte.

De vulfaktor is dus de verhouding van het totale oppervlak van de koperdoorsnede tot de beschikbare doorsnede.

De vulfactor is ongeveer 0,25 bij de hoogkantwikkeling. Bij wildwikkelen $v \approx 0{,}5$ en bij orthocyclisch wikkelen $v \approx 0{,}7$.

- *De gelijkstroomweerstand*

  Voor gelijkstroom is de grootte van de gelijkstroomweerstand R_{gelijk} van belang. Hoe dunner draad, des te groter R_{gelijk} en des te meer gelijkspanningsverlies er optreedt. Om dit te vermijden dient men dikker draad te kiezen. Dit kost echter meer wikkelruimte, zodat de spoel dan groter moet zijn.

- *De wisselstroomweerstand*

  Voor wisselstroom i heeft de spoel een wisselstroomweerstand R_{wissel} die bepalend is voor de warmte-ontwikkeling door i. Deze is van de frequentie afhankelijk omdat bij hoge frequenties het huideffect gaat optreden. Zoals we eerder hebben besproken wordt dan een kleiner deel van de draaddoorsnede voor de stroomdoorgang benut, d.w.z. dat R_{wissel} dan groter is. Bij hoge frequenties geldt dus algemeen

  $R_{wissel} > R_{gelijk}$.

Opmerking: verwar R_{wissel} niet met de reactantie ωL!

- *Het maximale vermogen*

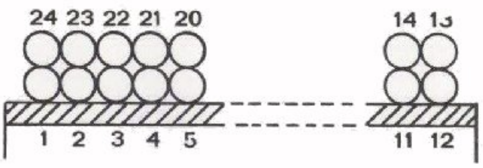
  Stellen we het maximaal te verwerken vermogen P_{max}.

  Voor gelijkstroom geldt: $P_{max} = I^2 \cdot R_{gelijk}$.

  Voor wisselstroom geldt dan $P_{max} = I^2_{eff.max.} \cdot R_{wissel}$. Dit betekent dat er een maximaal toelaatbare *stroom*sterkte is die niet overschreden mag worden omdat de spoel anders te heet wordt.

- *De maximale spanning*

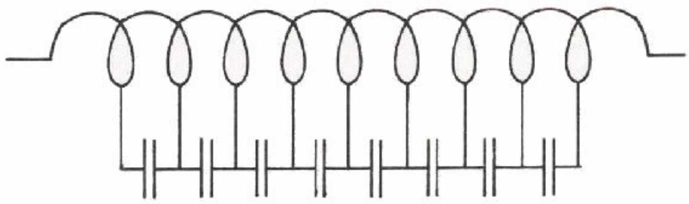
  Er is ook een maximaal toelaatbare *spanning* U_{max}.
  Tussen de verschillende windingen van een stroomvoerende spoel staat spanning. Verder zal er tussen twee opeenvolgende windingen minder spanning staan dan tussen twee verder uit elkaar gelegen windingen. Het laatste is b.v. van belang bij orthocyclisch wikkelen. Tussen de windingen 1 en 2 of tussen 23 en 24 komt niet veel spanning te staan. Tussen de windingen 1 en 24 komt echter veel meer spanning te staan en hiermee dient men rekening te houden.



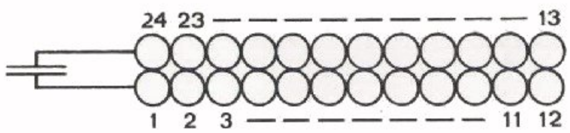
  Is deze spanning in verband met doorslag van de isolatie te hoog als men de lagen zonder meer over elkaar wikkelt, dan moet men tussen de lagen bijvoorbeeld een plastic folie aanbrengen. Dit is o.a. bij de hoogspanningsspoel van een TV-ontvanger het geval, waarbij tussen de windingen van opeenvolgende lagen een spanning van 1 kV ontstaat.

EEN SPOEL HEEFT OOK CAPACITEIT

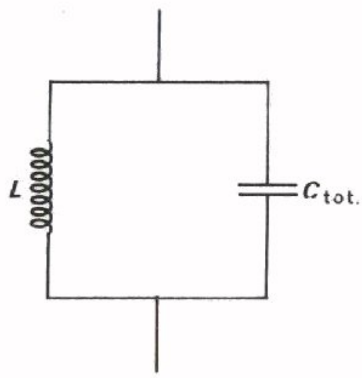
We vermelden ook nog de zg. *parasitaire capaciteit* tussen de windingen van de spoel. Tussen de diverse windingen is altijd enige capaciteit aanwezig die bij hoge frequenties een grote rol gaat spelen. Minimaal is de capaciteit bij de cylindrische wikkeling. Daar heeft men in hoofdzaak te maken met parasitaire C'tjes tussen de opeenvolgende windingen. Voor de gehele spoel staan al deze C'tjes in serie.



Veel groter is de capaciteit echter bij een orthocyclische wikkeling. Immers, daarbij treedt ook nog capaciteit op tussen windingen van twee opeenvolgende lagen en deze capaciteit staat over een groot aantal windingen tegelijk. Zo staat in nevenstaand voorbeeld het getekende C'tje over 23 windingen heen.

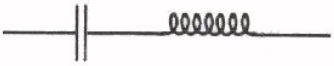


De gehele spoel heeft dan ook een veel grotere totale capaciteit dan die bij een cylindrisch gewikkelde éénlaagspoel.



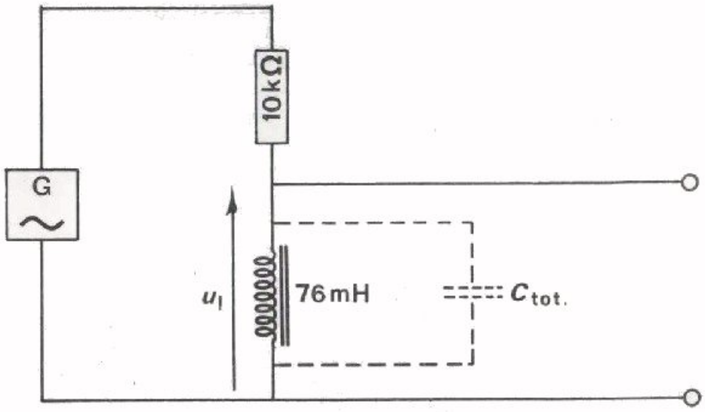
Als we van de verliezen afzien kunnen we een spoel nu voorstellen door de parallelschakeling van een zelfinductie L en een capaciteit C_{tot} die de gezamelijke C'tjes vertegenwoordigt. Zo is een spoel in wezen een *parallelkring*. Bij niet al te hoge frequenties is hij inderdaad een spoel met zelfinductie, waarvan de reactantie toeneemt als de frequentie toeneemt. Bij frequenties boven de resonantiefrequentie $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{tot}}}$ neemt je reactantie echter af en gedraagt hij zich als een capaciteit!

Opmerking: Vergelijk dit gedrag van een spoel met dat van een condensator. Een condensator heeft enige serie-zelfinductie en is daarom te beschouwen



als een *seriekring*. Bij niet al te hoge frequenties is hij inderdaad een capaciteit en neemt de reactantie af als f toeneemt. Boven f_o gedraagt hij zich echter als een zelfinductie en neemt de reactantie toe als f nog groter wordt.

OPDRACHT: EEN SPOEL HEEFT CAPACITEIT



- Bouw deze schakeling.
- Voer een wisselspanning toe U_t = 1 V.
- Sluit de oscilloscoop aan op de uiteinden van de spoel.
- Varieer de frequentie van 100 Hz tot 1 MHz en meet de top tot topwaarde van u_l bij de in onderstaande tabel vermelde frequenties.

f (Hz)	10^2	3.10^2	10^3	3.10^3	10^4	3.10^4	10^5	3.10^5	10^6
U_l (mV)									

U ziet nu:

Als f toeneemt, neemt de reactantie X van de spoel aanvankelijk toe, zodat van de toegevoerde spanning u een al maar groter deel over de spoel komt te staan. Bij een bepaalde frequentie f_o is X maximaal, en dus ook U_l.

Boven f_o zorgt de parallelcapaciteit C_{tot} van de spoel er voor dat X afneemt, en dus ook U_l afneemt.

- Bepaal nu globaal f_o. f_o = [kHz]
- Omdat u ook weet L = 76 mH, kunt u nu uitrekenen hoe groot C_{tot} is.
  U vindt dan: C_{tot} = [pF]

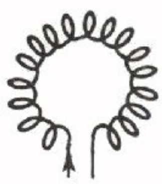
DE PERMEABILITEIT μ_r VAN KERNMATERIAAL

Door een spoel van een kern van magnetisch materiaal te voorzien, vergroot men zijn eigen magnetische veld. Zijn zelfinductie L wordt dus ook vergroot.

Als kernmateriaal past men toe:

- gelamelleerd ijzer.
- ferroxcube.
- poederijzer.

Voordat we wat meer vertellen over deze materialen moeten we het eerst hebben over het begrip "relatieve permeabiliteit" of kortweg *permeabiliteit* μ_r van een magnetisch materiaal.

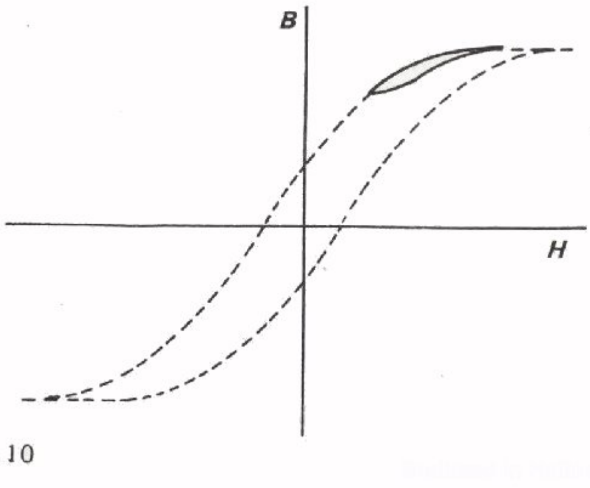


Als men door een ringvormige luchtspoel een gelijkstroom I stuurt, ontstaat er binnen de spoel een gesloten magnetisch veld Φ.
Vult men deze spoel nu helemaal met een gesloten ring van magnetisch materiaal, dan veroorzaakt dezelfde stroom I een véél sterker magnetisch veld Φ_m binnen de spoel. Immers, bij het veld van de spoel zelf komt nog het veld van het gemagnetiseerde materiaal, b.v. ijzer. De permeabiliteit μ_r geeft nu aan hoeveel maal zo sterk het veld binnen de spoel met kern is als het veld binnen de spoel zonder kern:

$$\mu_r = \frac{\Phi_m}{\Phi_o}.$$

Hoe groter dus de μ_r van een kernmateriaal is, des te meer neemt het magnetische veld van een spoel toe door inbrengen van dit materiaal.
Smoorspoelen zoals in les B122 onder andere besproken zijn, voeren een gelijkstroom. Deze gelijkstroom wordt door de gelijkrichter geleverd aan de belasting.

OPMERKING: De gelijkstroom veroorzaakt een "voormagnetisatie", dat wil zeggen dat het magneetveld in de kern steeds dezelfde kant op gericht is, alleen in gróótte varieert door de wisselstroom, die er ook doorloopt. De voormagnetisatie mag niet te groot worden, omdat dan de μ_r en daarmee de zelfinductie L_1 afneemt. Men spreekt van *verzadiging* van de kern.
Om de verzadiging te voorkomen zorgt men bij smoorspoelen voor een *luchtspleet* in de kern.



SOORTEN KERNMATERIAAL

De toepassing van de verschillende soorten kernmateriaal hangt af van het frequentiegebied.

- *Lage frequenties*

  Bij lage frequenties (tot circa 15 kHz) gebruikt men *gelamelleerd ijzer*. Dit ijzer met ongeveer 3% silicium wordt toegepast als een pakket van dunne blikplaatjes. De plaatjes zijn circa 0,35 mm dik en zij zijn aan één zijde van een isolerend laagje voorzien. Dit laatste bestaat uit oxyde en emaille. Het ijzer wordt gelamelleerd om het ontstaan van wervelstromen tegen te gaan. Wervelstromen veroorzaken namelijk verliezen. Deze behoren tot de zogenaamde ijzerverliezen. De permeabiliteit μ_r van gelamelleerd ijzer ligt tussen 8000 en 16 000 . Door het aanbrengen van een kern van gelamelleerd ijzer neemt de zelfinductie van een spoel dus aanzienlijk toe.

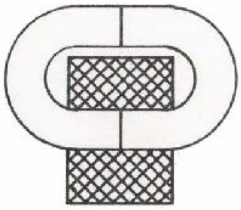
- *Hoge frequenties*

  Bij hoge frequenties (tot circa 25 MHz) gebruikt men *ferroxcube*. Dit is een keramisch materiaal dat weinig wervelstroom- en hysteresis verliezen met zich meebrengt. Het is echter wel veel eerder verzadigd dan ijzer, zodat het alleen geschikt is bij kleine stromen. De permeabiliteit μ_r van ferroxcube kan b.v. 6000 bedragen.

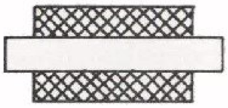
- Bij zeer hoge frequenties (boven circa 25 MHz) is *poederijzerkern*-materiaal in gebruik. Dit materiaal bestaat uit kleine ijzerkorreltjes, die door een isolerende kit tot één geheel zijn gebracht. De μ_r ligt tussen 5 en 10 en is dus niet zo groot. Bij zeer hoge frequenties is dit echter niet zo'n bezwaar, omdat de benodigde zelfinductie van spoelen dan toch niet erg groot is.

DE VORM VAN DE KERN

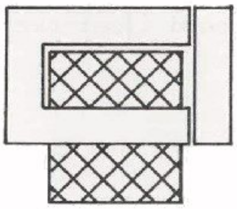
Tenslotte moeten we nog iets zeggen over de vorm van de kernen die in gebruik zijn.

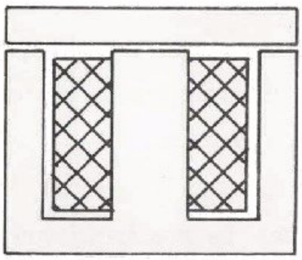


De zelfinductie neemt het meest toe door een spoel te voorzien van een gesloten kern.
De zelfinductie wordt μ_r x zo groot.



De zelfinductie neemt toe, maar veel minder, als men in plaats van een gesloten kern een staafje aanbrengt.

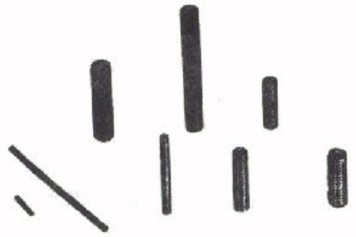




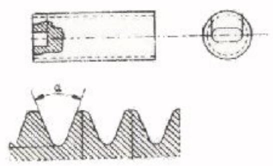
Vaak voorziet men een kern van twee luchtspleten. Hierdoor is de zelfinductie nogal wat kleiner dan zonder deze luchtspleten, maar hij is toch nog vééL groter dan in het vorige geval met een staafje. Een voordeel van het aanbrengen van de luchtspleet is dat het ijzer veel minder snel in verzadiging komt. De breedte van de luchtspleet heeft men in de hand door lijm met glaskogeltjes van een bepaalde diameter te gebruiken.

Veel in gebruik zijn *potkernen*. Dit zijn als het ware doosjes of potjes, die de spoel geheel of bijna helemaal omsluiten. Hierdoor wordt niet alleen de zelfinductie sterk vergroot, tevens wordt het magnetische veld naar buiten tot bijna niets teruggebracht. Potkernen zijn verder voorzien van een staafje van hetzelfde materiaal. Dit kan versteld worden ten einde de zelfinductiewaarde zeer precies in te kunnen stellen (b.v. tot op minder dan 1‰ nauwkeurig!).

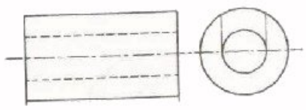
Op de volgende twee bladen geven we enkele voorbeelden van toegepaste kernen.



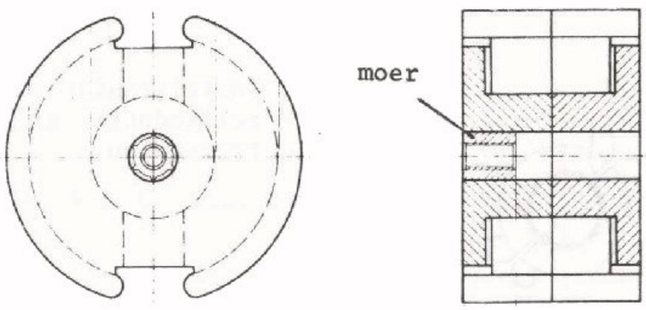
ferroxcube
staafkerntjes



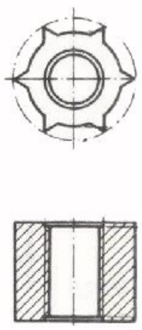
poederijzer
staafkerntje



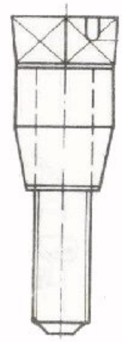
poederijzer
cylinder-kerntje



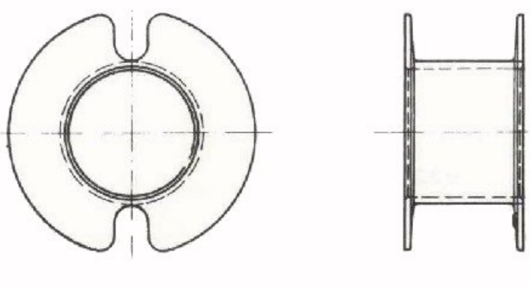
de potkern zelf



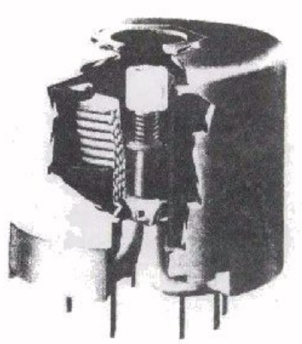
moer



instelstaafje
om zelf induc-
tie af te re-
gelen.

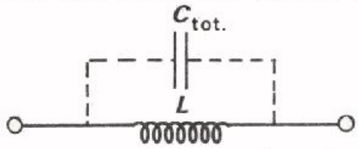


spoelkoker



gemonteerde cylindrische
potkern met bijbehoren.

- Een spoel heeft tussen zijn windingen capaciteit. Daarom is een spoel als het ware een *parallel-kring.*



C_{tot} vertegenwoordigt de gezamelijke C'tjes tussen de windingen.

Bij hoge frequenties (boven $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{tot}}}$) gaat de spoel zich als een capaciteit gedragen.

- De zg. *potkernen* hebben nog het voordeel dat buiten de potkern vrijwel geen magnetisch veld van de spoel aanwezig is.

- Naar buiten treden van het magnetische veld van kleine spoeltjes wordt voorkomen door ze in een metalen huisje op te bergen.
  Hierdoor neemt de L enigszins af.

B 124

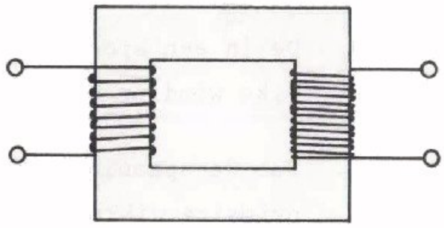
D E T R A N S F O R M A T O R ; A A N P A S S I N G

INLEIDING

In het A-deel van de cursus is de transformator behandeld. In deze les gaan we het daar behandelde nog een snel herhalen.
In de tweede helft komt een nieuw begrip ter sprake: aanpassing.

WAT IS EEN TRANSFORMATOR?

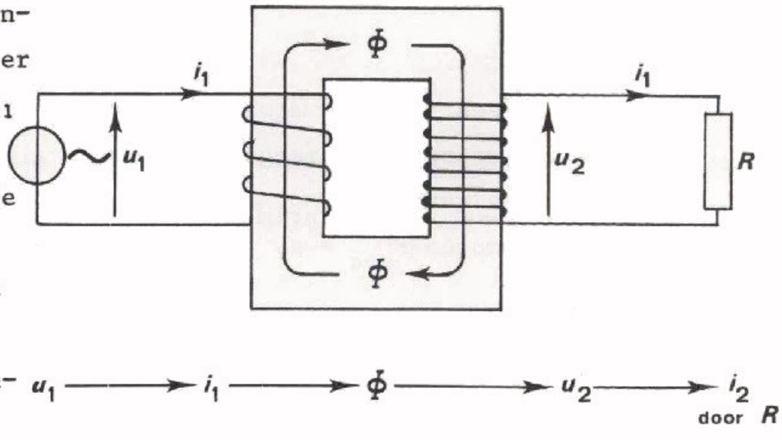
Twee gekoppelde spoelen vormen samen een transformator. De beide spoelen zijn meestal aangebracht op een gesloten kern. De transformator bestaat dan uit een kern die voorzien is van twee gescheiden wikkelingen, de primaire en de secundaire wikkeling.



Als een winding is gekoppeld met een *konstante* magnetische flux, wordt er *geen* inductiespanning in opgewekt.
Daarom is een transformator niet voor het transformeren van *gelijk*spanning te gebruiken.

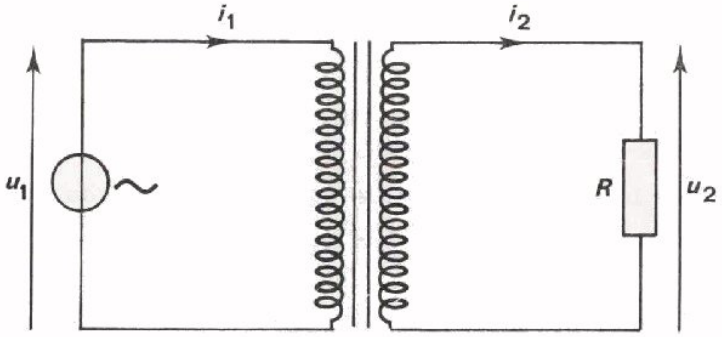
Als een winding is gekoppeld met een *veranderende* magnetische flux, wordt hierdoor een inductiespanning in de winding opgewekt.
Daarom is een transformator wel voor het transformeren van *wissel*spanning te gebruiken.

Voert men aan de primaire wikkeling een wisselspanning u_1 toe, dan loopt er een wisselende stroom i_1 door die wikkeling.
Deze wekt een wisselende magnetische flux op die gekoppeld is met de secundaire wikkeling.
Daardoor wordt in de secundaire wikkeling een



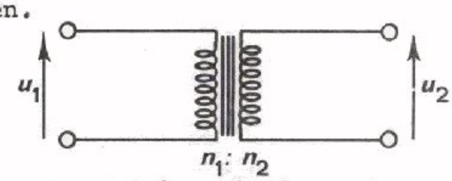
wisselspanning u_2 opgewekt. De geinduceerde wisselspanning u_2 kan tenslotte een secundaire wisselstroom i_2 doen lopen.

SPANNINGSTRANSFORMATIE



De in een spoel geïnduceerde spanning is in elke winding even groot omdat elke winding met eenzelfde magnetisch wisselveld is gekoppeld.

Dat de spanning per winding even groot is, geldt voor de secundaire én de primaire wikkeling van een transformator.
Als de primaire en secundaire windingen van een transformator gekoppeld zijn met één en hetzelfde veld, dan is de spanning per winding in alle primaire en secundaire windingen even groot.
Hieruit volgt dat de secundaire en de primaire spanningen zich verhouden als het aantal secundaire en primaire windingen.
In formule:



$$u_2 : u_1 = n_2 : n_1$$

Door een juiste keuze van aantallen primaire- en secundaire windingen kan elke gewenste spanningsverhouding worden verkregen.
De verhouding van de aantallen primaire- en secundaire windingen noemt men de *wikkelverhouding* n_2/n_1.

STROOMTRANSFORMATIE

Als in een transformator geen vermogen verloren gaat (ideale transformator), is het afgegeven vermogen even groot als het toegevoerde. Het primaire toegevoerde vermogen $P_{prim} = u_1 \cdot i_1$ is dus gelijk aan het secundaire afgegeven vermogen $P_{sec} = u_2 \cdot i_2$.

Dus:

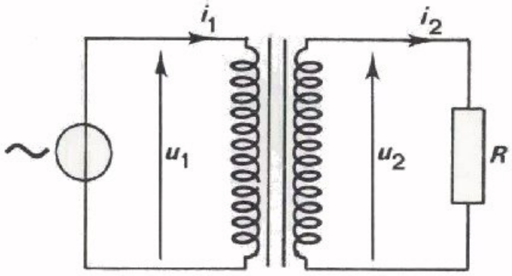
$$P_{prim} = P_{sec}$$

$$u_1 \cdot i_1 = u_2 \cdot i_2 \quad \text{of} \quad \frac{u_1}{u_2} = \frac{i_2}{i_1}.$$

Combineren we dit met het bovenstaande, dan vinden we:

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

WEERSTANDSTRANSFORMATIE



Bij een *transformator die met een weerstand is belast* voert de spanningsbron een wisselspanning en een wisselstroom toe die met elkaar in fase zijn. Met andere woorden, de spanningsbron "ziet een ingangsweerstand".

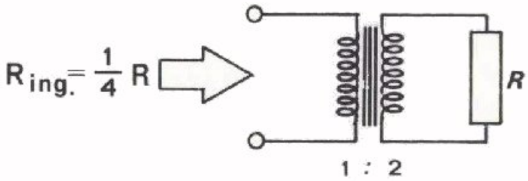
$$R_{ing} = \frac{u_1}{i_1}.$$

Met behulp van de formule onderaan het vorige blad kan men dit schrijven als:

$$R_{ing} = (\frac{n_1}{n_2})^2 \; . \; R$$

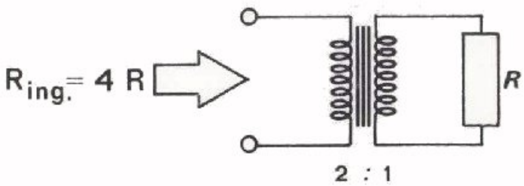
- Wordt de spanning omhoog getransformeerd, dan ziet men primair een kleinere weerstand dan R.

  Voorbeeld:



- Wordt de spanning omlaag getransformeerd, dan ziet men primair een grotere weerstand dan R.

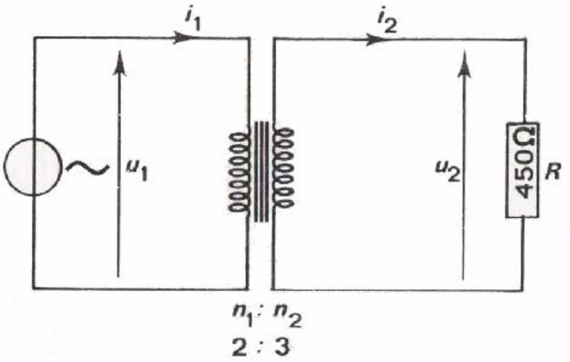
  Voorbeeld:



Aan de kant van de kleinste spanning ziet men ook de kleinste weerstand.

OEFENINGEN

1.



Bij deze transformator is de primaire spanning $U_{1(eff)}$ = 12 V.

$U_{2(eff)}$ =

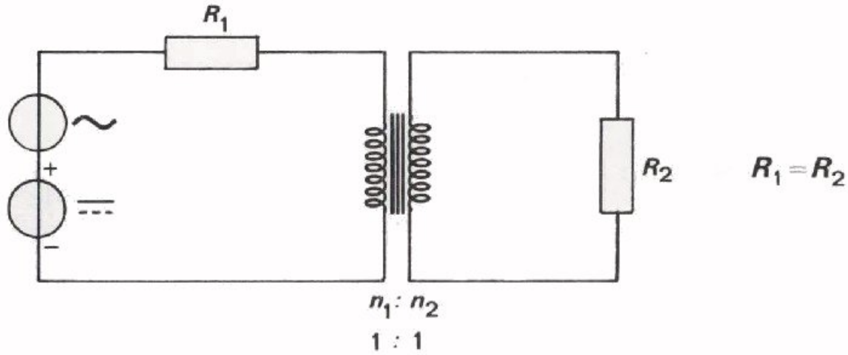
$I_{2(eff)}$ =

$I_{1(eff)}$ =

Welke weerstand "ziet men" aan de primaire kant van deze transformator?

R_{ing} =

2.



Aan deze schakeling met ideale transformator wordt een *wissel*stroomvermogen van 200 mW en een *gelijk*stroomvermogen van 100 mW toegevoerd.

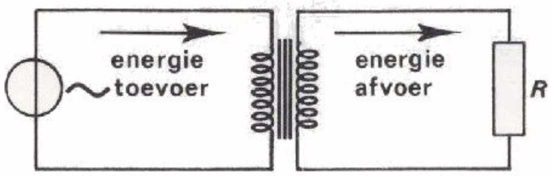
In de weerstand R_2 aan de secundaire zijde wordt een vermogen ontwikkeld, dat:

gelijk is aan 100 mW O
gelijk is aan 150 mW O
gelijk is aan 200 mW O
gelijk is aan 300 mW O

VERLIEZEN

Sluit men bij een transformator primair een wisselspanning aan, dan loopt er primair een wisselstroom. Aan de primaire zijde wordt dus een wisselstroomenergie toegevoerd.

Aan de secundaire zijde wordt er bijvoorbeeld aan een weerstand energie geleverd.



Bij een zogenaamde *ideale transformator* neemt de trafo zelf geen energie op. De afgegeven energie is precies even groot als de toegevoerde. Hoewel men bijna altijd met een ideale transformator rekent, bestaat deze in werkelijkheid niet. Bij een *praktische transformator* neemt de transformator zelf wel enige energie op, zodat de afgegeven energie altijd kleiner is dan de toegevoerde. Binnen in de transformator treden *verliezen* op.

We onderscheiden hierbij:

- *koperverliezen*; deze zijn te wijten aan de weerstand van de koperen wikkelingen.
- *ijzerverliezen*; deze zijn te wijten aan:
  - de moeite die het kost om het ijzer telkens om te magnetiseren (hysteresisverliezen).
  - het optreden van inductiestromen in het ijzer van de kern (wervelstroomverliezen).

Bij een *praktische transformator* geldt nu niet meer precies:

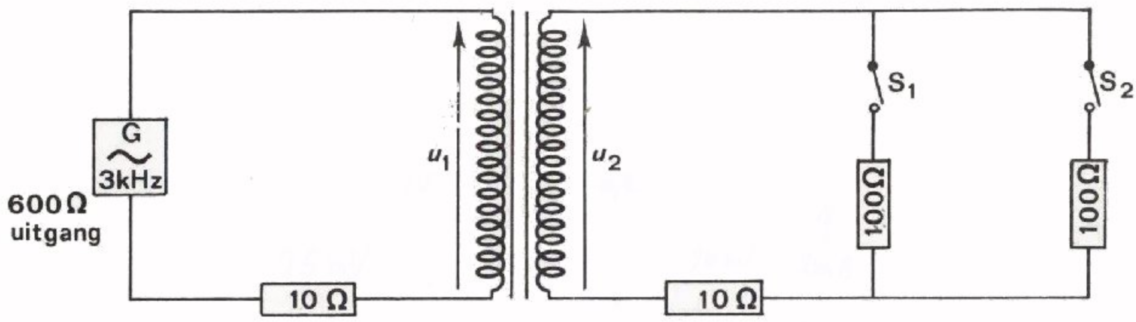
$$u_1 : u_2 = n_1 : n_2$$

en $$i_1 : i_2 = n_2 : n_1$$

vanwege de optredende verliezen.

Bij benadering blijft het echter waar en in de praktijk rekent men daarom bijna altijd met deze eenvoudige formules.

OPDRACHT: METEN AAN EEN TRANSFORMATOR



- Bouw deze schakeling met de gegeven transformator.
  De primaire aansluitdraden van de transformator zijn rood.

  Voer volgende metingen alle uit met de oscilloscoop.
  Bepaal daarbij de spanningen U_{1_t} en U_{2_t} *direct* en de stromen I_{1_t} en I_{2_t} *indirect* door de spanningen over de weerstanden van 10 Ω te meten.

● Meting 1.

- Houd S_1 en S_2 open.
  Stel U_{1_t} in op 100 mV en meet U_{2_t}.
  De verhouding $U_{1_t} : U_{2_t}$ = [:]

  Stel U_{1_t} in op 400 mV en meet weer U_{2_t}.
  De verhouding $U_{1_t} : U_{2_t}$ = [:]

● Meting 2.

- Sluit S_1 en laat S_2 open. Stel U_{1_t} in op 100 mV.
  Bepaal nu:

  $U_{1_t} : U_{2_t}$ = [ ] en $I_{1_t} : I_{2_t}$ = [: 1]

Meting 3.

- Sluit S_1 en S_2 beide. Stel U_{1_t} in op 100 mV.
  Bepaal:

  $U_{1_t} : U_{2_t}$ = [ ] en $I_{1_t} : I_{2_t}$ = [: 1]

CONCLUSIES: U heeft nu zelf ervaren:

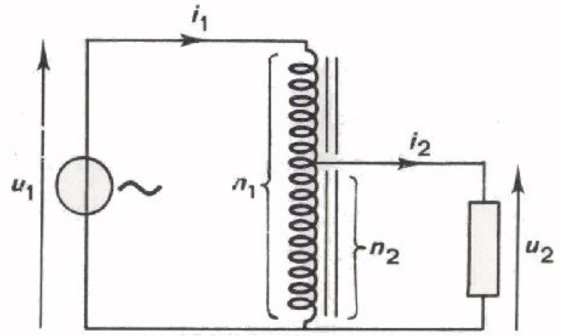
- De spanningstransformatie u_2/u_1 hangt niet af van de grootte van de toegevoerde spanning, (meting 1).
- Als men de spanning *omhoog* transformeert, transformeert men tegelijkertijd de stroom *omlaag* (meting 2).
- Als men sterker gaat belasten, nemen de inwendige koperverliezen toe, waardoor inwendig ook meer spanning verloren gaat en u_2/u_1 hierdoor afneemt (metingen 2 en 3).

  Daarbij neemt i_2/i_1 niet af.

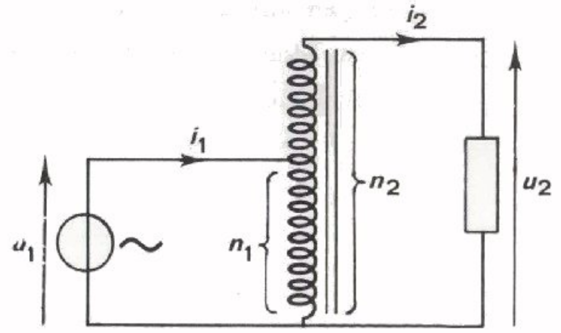
DE AUTOTRANSFORMATOR

Een autotransformator heeft slechts één wikkeling.
Er zijn nu twee mogelijkheden.

- De primaire wisselspanning wordt aan de gehele spoel toegevoerd en de secundaire spanning wordt van een deel van de spoel afgenomen. In dit geval wordt de spanning u_1 omlaag getransformeerd.



- De primaire wisselspanning wordt aan een deel van de spoel toegevoerd en de secundaire spanning wordt van de gehele spoel afgenomen.
  In dit geval wordt de spanning u_1 omhoog getransformeerd.



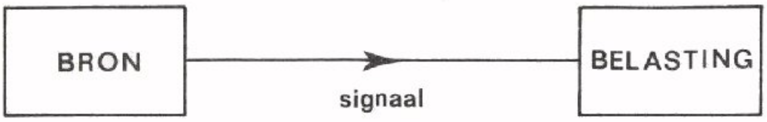
Het principe van een autotransformator is precies hetzelfde als dat van een gewone transformator. Ook nu geldt:

$$\boxed{\frac{u_1}{u_2} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{n_1}{n_2}}$$

Een voordeel van de autotransformator is dat de koperverliezen geringer zijn. Een nadeel van de autotransformator is dat het primaire en het secundaire circuit niet meer elektrisch van elkaar gescheiden zijn. Dit gescheiden zijn van de wikkelingen is namelijk vaak een reden om een gewone transformator te gebruiken.

AANPASSING

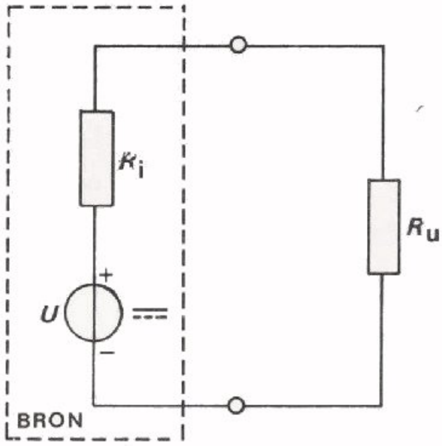
Het komt in de elektronica herhaaldelijk voor dat een signaal van een *bron* moet worden doorgegeven aan een *belasting*.



In de meeste gevallen gaat dit niet zonder meer. Bron en belasting moeten aan elkaar worden *aangepast*. Aan de hand van een aantal voorbeelden zullen we zien wat we onder *aanpassing* verstaan.

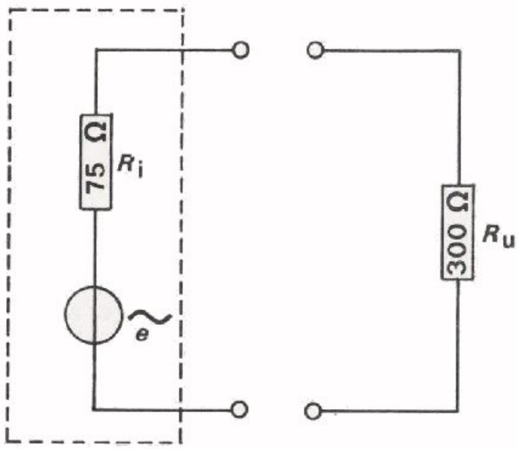
VOORBEELD

We beginnen met een voorbeeld dat we al meer dan eens zijn tegengekomen. We gaan uit van een gelijkspanningsbron. Deze heeft een inwendige weerstand R_i en een EMK U. Hij levert energie aan een belasting R_u. We hebben eerder geleerd dar er maximale energie wordt doorgegeven, als de uitwendige weerstand R_u gelijk is aan de inwendige weerstand R_i. Onder "aanpassen" verstaan we hier "er voor zorgen dat maximale energie wordt doorgegeven". In dit voorbeeld betekent dit zorgen dat $R_u = R_i$. Er is sprake van energie-aanpassing.

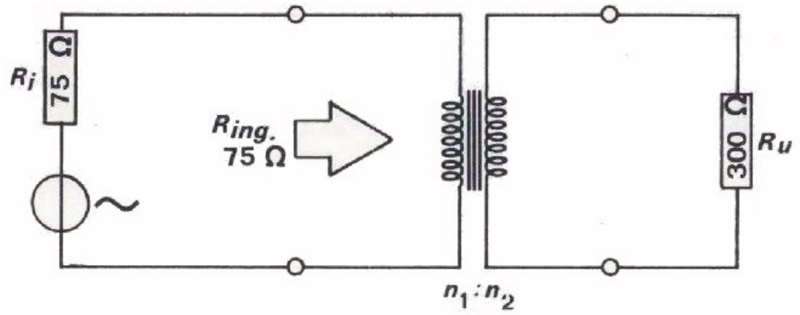


Hetzelfde geldt voor een wisselspanningsbron met inwendige weerstand R_i en EMK e. Ook hier hebben we energie-aanpassing als $R_u = R_i$.

Stel dat we een wisselspanningsbron hebben met $R_i = 75\ \Omega$ die zoveel mogelijk energie moet leveren aan een weerstand $R_u = 300\ \Omega$. Dit is zeker niet het geval als we deze R_u direkt op de bron aansluiten.



Met behulp van een transformator kunnen we nu voor energie aanpassing zorgen. Daartoe moeten we tussen bron en belasting een zodanige transformator plaatsen, dat R_{ing} = 75 Ω, als we de transformator met 300 Ω belasten.
De bron "ziet dan immers een belasting die gelijk is aan zijn inwendige weerstand.
Dus:



R_i = 75 Ω $\qquad$ R_{ing} = 75 Ω $\qquad$ R_u = 300 Ω

$$R_{ing} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 . R_u = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 . 300\ \Omega$$

R_i = 75 Ω

Juiste aanpassing ontstaat, als:

$$R_i = R_{ing}$$

$$75 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 . 300$$

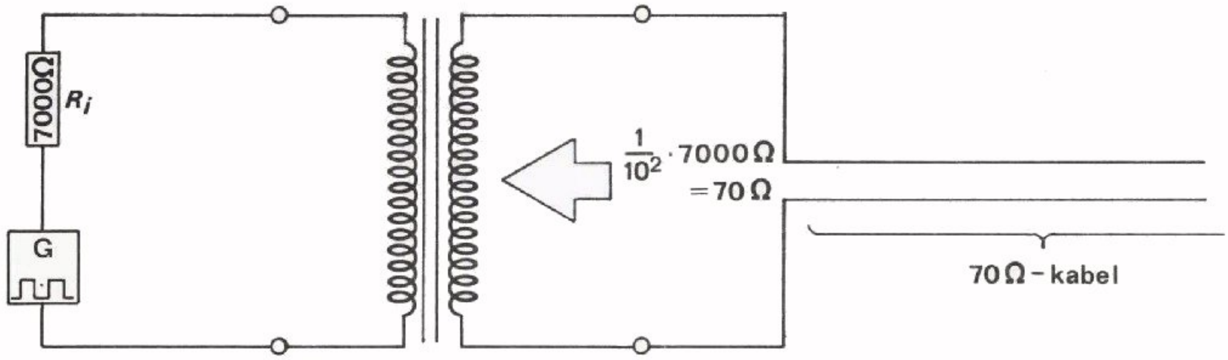
$$\frac{75}{300} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2}$$

$n_1 : n_2 = 1 : 2$ toe te passen, kunnen we in dit geval dus energieaanpassing verkrijgen.

ANDERE VOORBEELDEN VAN AANPASSING.

- Het komt vaak voor dat pulsvormige HF-signalen via een kabel getransporteerd worden. Neemt men nu geen bijzondere maatregelen, dan blijkt zo'n signaal onderweg sterk vervormd te worden.
  Zonder daar verder op in te gaan, vermelden we dat een kabel een zogenaamde *karakteristieke impedantie* heeft. Voorbeelden zijn de 300 Ω - lintkabel die bij TV wordt gebruikt. Men gebruikt zo'n kabel alleen dan goed als men er voor zorgt dat hij aan het begin zijn karakteristieke impedantie "ziet".
  Stel nu dat men beschikt over een HF-signaalbron met een inwendige weerstand R_i van bijvoorbeeld 7000 Ω en dat men een 70 Ω kabel wil aansluiten. Men zal dan voor aanpassing moeten zorgen. Door middel van een transformator met $n_1 : n_2 = 10 : 1$ kan men dit bereiken.

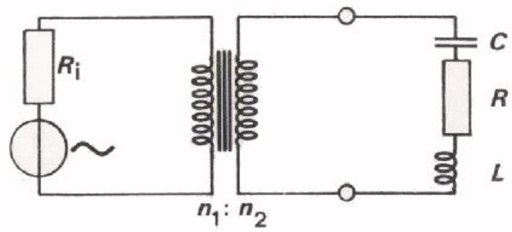


  Signaalbron en kabel zijn nu door middel van de transformator op elkaar aangepast.

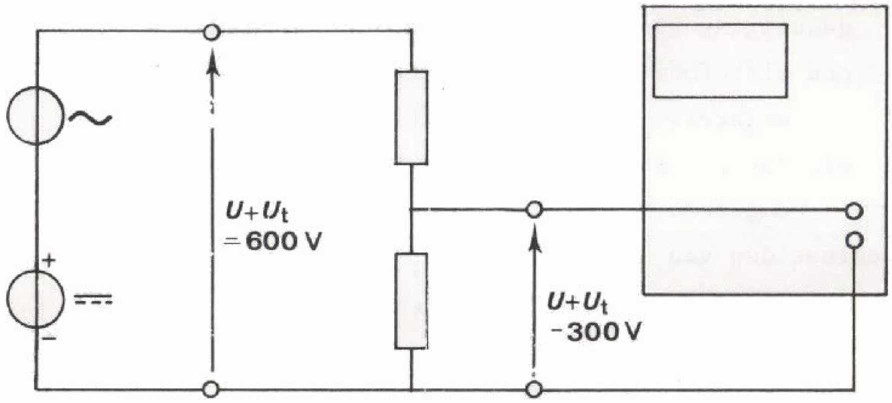
- Vervolgens een voorbeeld waarbij men moet aanpassen om te voorkomen dat de bron er onder te lijden krijgt.
  Denk eens aan een serieresonantiekring. In de buurt van resonantie is de impedantie van de kring buitengewoon laag. Direkt vanuit een generator toevoeren van de wisselspanning is dan niet goed mogelijk, omdat de generator bij een belasting die hem nagenoeg kortsluit niet goed meer werkt. Men moet weer aanpassen en doet dit door middel van een trafo die primair veel meer windingen heeft dan secundair. De generator ziet dan bij resonantie een grotere weerstand

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 R.$$

  Hierin is R de weerstand bij resonantie.



Tenslotte nog een voorbeeld van aanpassing waarbij we er voor zorgen dat de belasting niet te lijden heeft. Aan de oscilloscoop die we steeds gebruiken mag geen grotere spanning dan 400 V worden toegevoerd, anders gaat hij defekt. Voert men een pulserende gelijkspanning toe die gelijk is aan de som van een gelijkspanning U en een wisselspanning u, dan mag $U + U_t$ hoogstens 400 V bedragen. Wil men nu een signaal bekijken waarbij $U + U_t$ groter is dan 400 V (b.v. 600 V), dan moet er aangepast worden. Dit kan b.v. met behulp van een spanningsdeler, die het toe te voeren signaal tot de helft terugbrengt.



Vraag:

Is het mogelijk in dit laatste voorbeeld om een aanpassingstransformator te gebruiken in plaats van de getekende weerstandsaanpassing.

Antwoord:

____

____

____

____

____

____

____

We hebben nu vier voorbeelden van aanpassing gezien.

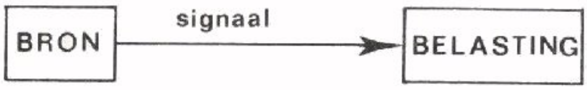
- In het eerste voorbeeld (blad B123 - 9) kozen we de belasting zo dat maximale energie van bron naar belasting werd doorgegeven.
- In het tweede voorbeeld pasten we HF-bron en kabel op elkaar aan om ervoor te zorgen dat de HF-signalen onderweg niet vervormd worden.
- In het derde voorbeeld pasten we aan om de bron te beschermen.
- In het vierde voorbeeld werd voor aanpassing gezorgd om defekt raken van de belasting te voorkomen.

WAT IS AANPASSEN IN HET ALGEMEEN

Na de voorafgaande voorbeelden gaan we trachten meer in het algemeen te zeggen wat aanpassing is.

We hebben in dit verband altijd te maken met:

- een bron
- een signaal
- een belasting



Voorbeelden van "bronnen":

een wisselspanningsgenerator,

de uitgang van een versterker,

een microfoon die een geluidssignaal in een elektrisch signaal heeft omgezet,

een antenne die opgevangen radiosignalen in elektrische signalen heeft omgezet.

Voorbeelden van "belastingen":

de ingang van een versterker,

een luidspreker,

een relais,

een televisie-beeldbuis.

Het signaal dat van bron naar belasting wordt doorgegeven, is vaak elektrische energie in de vorm van stroom en spanning.

Uit de voorafgaande voorbeelden werd duidelijk dat men een belasting niet altijd zonder meer op een bron kan aansluiten. In vele gevallen gaat er dan iets mis: óf met de bron, óf met het signaal, óf met de belasting. Om nu te zorgen dat het goed gaat, moeten bron en belasting op elkaar aangepast worden; anders gezegd: "Men moet voor aanpassing zorgen".

Samenvattend:

Aanpassen is zorgen dat een elektrisch signaal optimaal van bron naar belasting wordt doorgegeven.

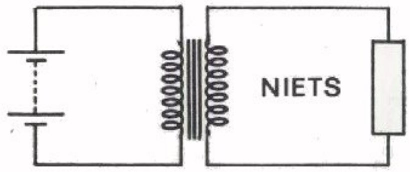
"Optimaal" wil hier zeggen dat er zo goed mogelijk aan van tevoren gestelde eisen wordt voldaan. Dit kan o.a. zijn:

- zoveel mogelijk vermogen aan de belasting toevoeren.
- vermogen leveren met zo min mogelijk verlies.
- het signaal onvervormd doorgeven.
- de bron belasten zonder dat hij er onder te lijden heeft.
- de belasting van signaal voorzien zonder dat deze er onder te lijden heeft.

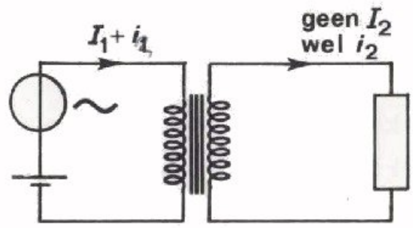
De transformator is een veelgebruikt hulpmiddel bij het aanpassen van bron en belasting.

SAMENVATTING

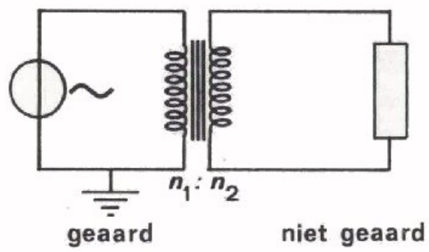
De voornaamste eigenschappen van een trafo zijn:



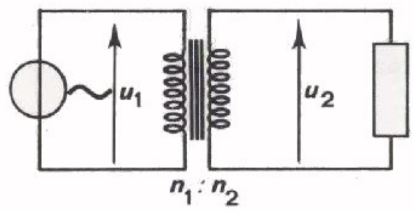
- Een transformator werkt *niet* op gelijkspanning.
  Voor de werking van een transformator is een veranderende magnetische flux noodzakelijk.



- De primaire en de secundaire stroomkringen zijn geheel van elkaar gescheiden. Zo zal bijvoorbeeld een in de primaire stroomkring aanwezige gelijkstroom in de secundaire kring niets veroorzaken.

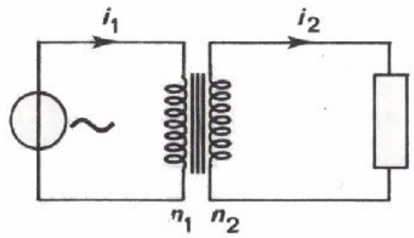


- Verder zal aarding van de ene stroomkring niet automatisch ook aarding van de andere tot gevolg hebben.



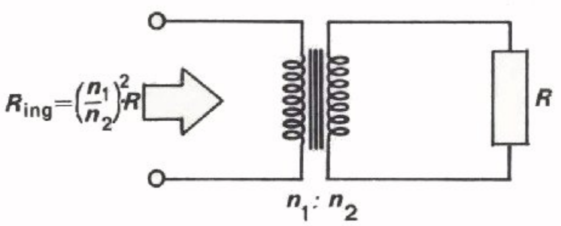
- Een transformator kan een wisselspanning omhoog (als $n_2 > n_1$) of omlaag (als $n_2 < n_1$) transformeren:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{n_2}{n_1}$$



- Een transformator kan een wisselstroom omlaag (als $n_2 > n_1$) of omhoog (als $n_2 < n_1$) transformeren:

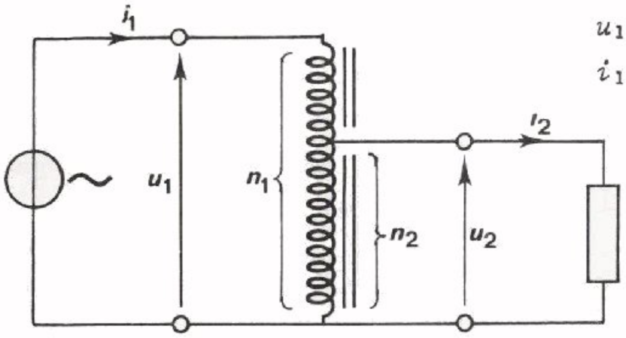
$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{n_1}{n_2}$$



- Een transformator kan een weerstand omlaag (als $n_2 > n_1$) of omhoog (als $n_2 < n_1$) transformeren:

$$R_{ring} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot R$$

Een *autotransformator* is een transformator met slechts één wikkeling die is afgetakt.



$u_1 : u_2 = n_1 : n_2$

$i_1 : i_2 = n_2 : n_1$

Voordeel is o.a. dat er minder grote koperverliezen optreden. Nadeel is dat primair- en secundair circuit elektrisch niet meer gescheiden zijn.



Als een "bron" signaal moet toevoeren aan een "belasting" is dit vaak niet mogelijk door direkte doorverbinding.
Dan zal er nl. iets mis gaan. *Aanpassen* is nu "ervoor zorgen dat het over te brengen elektrische signaal (spanning of vermogen) optimaal van bron naar belasting wordt doorgegeven".
In vele gevallen wordt hiervoor de transformator gebruikt.

"Optimaal" betekent hier dat er zo goed mogelijk aan van tevoren gestelde eisen wordt voldaan, zoals:

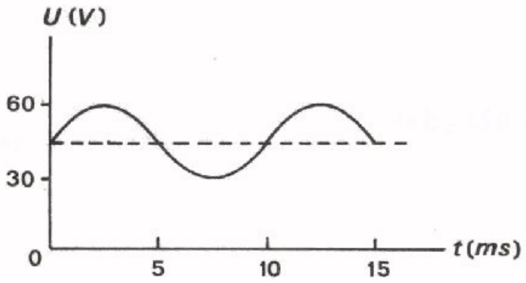
- maximaal vermogen toevoeren.
- het signaal onvervormd doorgeven.
- de bron belasten zonder dat hij er onder te lijden heeft.
- de belasting van signaal voorzien zonder dat hij er onder te lijden heeft.

NAAM:

KLAS:

OEFENINGEN

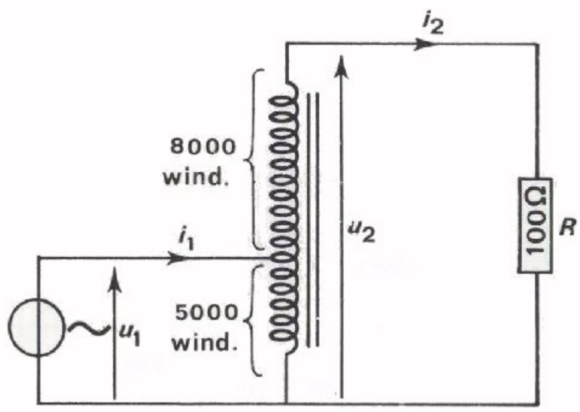
1. Aan een ideale trafo met een wikkelverhouding $n_1 : n_2 = 3 : 8$ wordt primair volgende spanning toegevoerd.



Bepaal de effectieve waarde van de secundaire spanning.

U_{2eff} =

2.



Aan deze ideale autotransformator meet men primair een spanning van 60 V.

Hoe groot is de stroom I_2?

I_2 =

Hoe groot is I_1?

I_1 =

3. We beschikken over een wisselspanningsbron met een inwendige weerstand van 50 Ω.

Via een aanpassingstransformator sluiten we hierop een belastingsweerstand aan van 1,8 kΩ.

We gebruiken deze transformator, omdat we zoveel mogelijk energie willen leveren aan de weerstand.

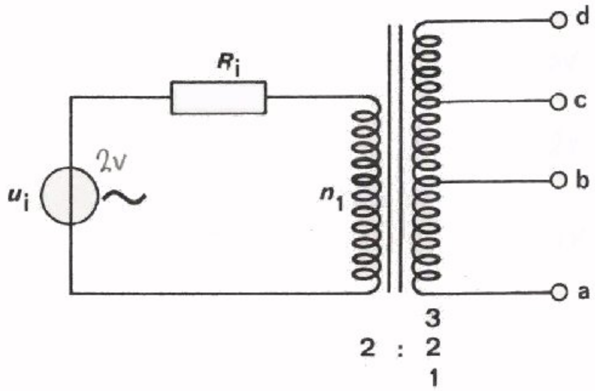
Hoe moeten we de wikkelverhouding van de transformator kiezen?

$\frac{n_1}{n_2}$ =

4. Een transformator met meerdere aftakkingen op de secundaire wikkeling wordt gevoed uit een spanningsbron met R_i = 100 Ω. De toegevoerde spanning bedraagt U_i = 2 V.

De wikkelverhouding bedraagt

$n_1 : n_{ab} : n_{bc} : n_{ed} = 2 : 1 : 1 : 1$



Bereken de spanningen U_{ba}, U_{ca} en U_{da}.

U_{ba} =

U_{ca} =

U_{da} =

Bereken de stroom die loopt door een kortsluiting van b met a, van c met a en van d met a.

Verwaarloos hierbij de optredende koper- en ijzerverliezen.

I_{ba} =

I_{ca} =

I_{da} =

Bereken de getransformeerde weerstand die u secundair tussen de klemmen ba, ca en da kunt meten.

R_{ba} =

R_{ca} =

R_{da} =

Opmerking:

Vergelijk telkens de verhouding $\frac{u}{i}$ met de berekende weerstand.

B 125

DE COMPONENT "TRANSFORMATOR"

INLEIDING

Een transformator bevat tenminste twee spoelen op een gemeenschappelijke kern. Vele punten die we bij spoelen behandeld hebben komen ook hier weer aan de orde. Ook bij een transformator zijn van belang:

- de wikkelingen,
- het kernmateriaal.

Ook bij een transformator dient men steeds te bedenken in welk frequentiegebied hij wordt toegepast.

In deze les komt eerst de nettransformator ter sprake. Aan de hand van deze transformator behandelen we een aantal praktische punten. Daarna gaan we verder met transformators die bij spanningen met veel hogere frequenties worden toegepast.

DE NET-TRANSFORMATOR

Het lichtnet waarop al onze huizen zijn aangesloten, heeft een spanning van 220 V, en een *lage* frequentie van 50 Hz. De topwaarde van de netspanning bedraagt $U_t = 220 \sqrt{2} \approx 310$ V. Bij het net treden echter zo nu en dan stoorspanningen op met pieken tot wel 1500 V.

Een transformator die op het lichtnet wordt aangesloten, noemt men een *nettransformator*. Primair wordt op deze transformator dus een spanning van 220 V aangesloten.

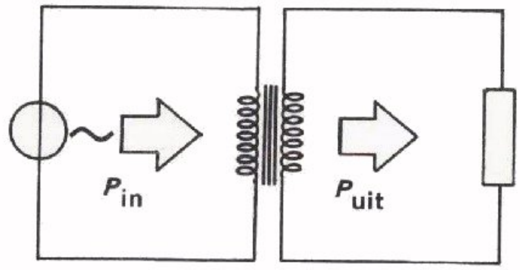
De wikkelingen zijn meestal op een spoelkoker aangebracht die daarna op een gelamelleerde kern van Si-ijzer wordt geschoven. Soms zijn de wikkelingen over twee spoelkokers verdeeld.
In verband met de genoemde hoge piekspanningen brengt men tussen de wikkelingen een zó goede isolatie aan, dat bij spanningen van 2000 V nog geen doorslag optreedt.

Om de transformator te beschermen tegen te grote verhitting brengt men in serie met de primaire wikkeling vaak een *smeltveiligheid* aan. Deze behoedt de transformator voor te grote stromen.

HET RENDEMENT

Een ideale transformator heeft geen verliezen. Het uitgangsvermogen is gelijk aan het ingangsvermogen.

Een praktische transformator is niet ideaal; er treden namelijk koper- en ijzerverliezen op. Dit betekent dat het afgegeven vermogen P_{uit} kleiner is dan het toegevoerde vermogen P_{in}



$$P_{uit} < P_{in} .$$

Zoals vaak in de techniek spreekt men bij transformators van het *rendement*, aangeduid met de griekse letter η, (spreek uit: "etta").

In formule:

$$\eta = \frac{P_{uit}}{P_{in}} \times 100\%$$

Het rendement is dus de verhouding van uit- en ingangsvermogen in procenten.

Bij een ideale transformator: $\eta = 100\%$.

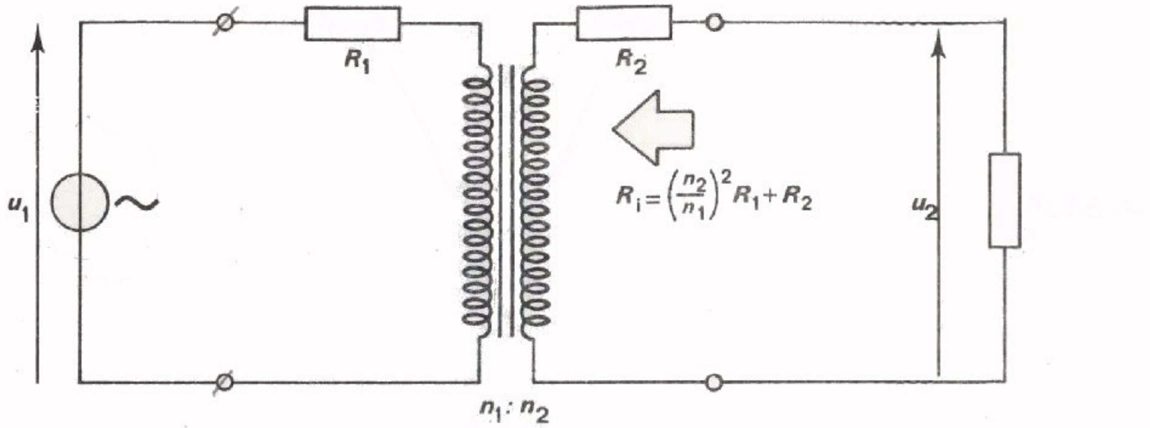
Bij een praktische transformator: $\eta < 100\%$.

Om enig idee te krijgen van in de praktijk optredende rendementen hier enkele voorbeelden:

- Een kleine transformator met gelamelleerd ijzeren kern die gemaakt is voor 7,5 W heeft bijvoorbeeld een rendement $\eta = 66\%$, (4% ijzerverlies en 30% koperverlies).
- Een grotere transformator gemaakt voor 50 W heeft bijvoorbeeld een rendement $\eta = 86\%$, (4% ijzerverlies en 10% koperverlies).

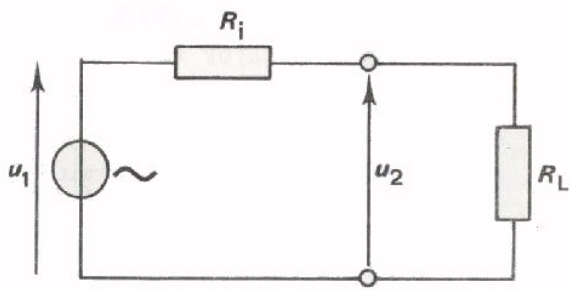
Bij een niet belaste transformator treden alleen maar ijzerverliezen op. De primaire stroom is dan zo klein dat de koperverliezen geen rol spelen. Bij maximale belasting blijven de ijzerverliezen nog ongeveer even groot, maar de koperverliezen zijn dan maximaal.

DE INWENDIGE WEERSTAND R_i.



Een transformator die op het wisselstroomnet is aangesloten, vormt een wisselspanningsbron met zekere inwendige weerstand R_i.
De inwendige weerstand van het net kunnen we wel gelijk aan nul stellen.
De transformator-wikkelingen zelf hebben echter een niet te verwaarlozen ohmse weerstand.
De primaire ohmse weerstand noemen we R_1.
De secundaire ohmse weerstand noemen we R_2.
De inwendige weerstand die de belasting R_L "terugziet" is:

$$R_i = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 R_1 + R_2$$



Hoe meer stroom er secundair wordt afgenomen, des te meer spanningsverlies treedt over R_1 en R_2 op en des te kleiner is de secundaire klemspanning u_2.

OEFENING

Voor de boven getekende belaste transformator geldt:

U_1 = 220 V
R_1 = 400 Ω
R_2 = 500 Ω
R_L = 25 Ω
$n_1 : n_2$ = 4 : 1

Bereken:

R_i = ☐

IJzerverliezen zijn te verwaarlozen klein.

DE AFMETINGEN VAN EEN TRANSFORMATOR

De afmetingen van een transformator worden bepaald door de grootte van de kern en de grootte van de wikkeling(en).

Nu kan men:

- de kern klein houden en de spoelruimte groot,
- de kern fors kiezen en de spoelruimte klein.

Een ontwerper van transformators zal daar ergens tussenin gaan zitten. Daarbij bedenkt hij:

- hoe groter kern, des te minder ijzerverlies,
- hoe groter spoel, des te minder koperverlies; hij kan dan dikkere draad gebruiken en daardoor wordt R_i kleiner.

Algemeen geldt dat als men een transformator voor een bepaald doel groter construeert, dat dan het rendement ook beter is.

Als een transformator een *groter vermogen* moet doorgeven, dan moet hij ook *groter van afmetingen* zijn. Ons technisch instinct ziet onmiddellijk in dat het niet mogelijk is een vermogen van vele kW door te geven met een transformator ter grootte van een luciferdoosje. Laten we er echter eens wat precieser naar kijken.

Stel dat een LF-transformator van 220 V - 50 Hz een vermogen moet verwerken van 22 W.

Dan geldt: $I_1 = \frac{P}{U_1} = \frac{22}{220} = 0{,}1$ A,

en $I_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot I_1 = \frac{n_1}{n_2} \cdot 0{,}1$ A

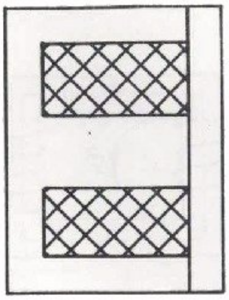
Moet een andere trafo met dezelfde wikkelverhouding en ook primair 220 V - 50 Hz een vermogen verwerken van 220 W, dan wordt de berekening:

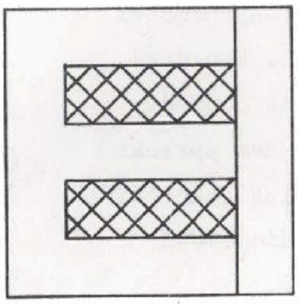
$$I_1 = \frac{220}{220} = 1 \text{ A en } I_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot 1 \text{ A.}$$

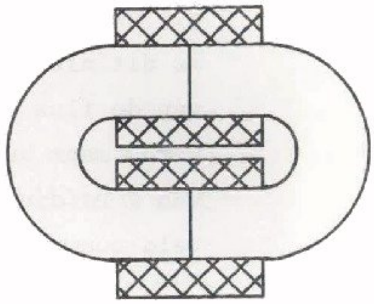
De stromen in de tweede transformator zijn dus 10 x zo groot. Om de koperverliezen te beperken moet men veel dikker draad kiezen. De afmetingen van de spoelen worden dus veel groter.
Bovendien moet men bij de tweede transformator de draad dikker kiezen, omdat het inwendige spanningsverlies bij deze grote stromen anders veel te groot zou worden.

TRANSFORMATOR-KERNEN

De *kern* van nettransformators is van gelamelleerd Si-ijzer gemaakt. Er bestaan verschillende vormen, waarvan hieronder enkele veel toegepaste zijn getekend.







M-I-combinatie E-I-combinatie dubbele C

Het rechtse voorbeeld is een transformator met een dubbele C-kern. Bij de vervaardiging wikkelt men één lange 0 van een strook Si-ijzer blik, die daarna tot een compact geheel wordt samengekit. Deze langgerekte 0 wordt tenslotte door midden gezaagd.

Een transformator wordt ontworpen voor een bepaalde primaire spanning met een gegeven frequentie. De kernafmetingen worden daarbij niet groter gekozen dan nodig is. D.w.z., bij gegeven frequentie komt de kern net niet in verzadiging.
Sluit men primair een *grotere spanning* met dezelfde frequentie, of een even grote spanning met een *lagere frequentie* aan, dan komt de kern wel telkens in verzadiging. Hierdoor nemen de koperverliezen aanzienlijk toe. De transformator wordt daardoor te heet en raakt defekt. Een 110 V - 50 Hz transformator mag men dus *niet* op 220 V - 50 Hz aansluiten, ook al belast men hem bijna niet! Evenmin mag men een voor 110 V - 300 Hz ontworpen transformator aansluiten op 110 V - 50 Hz!

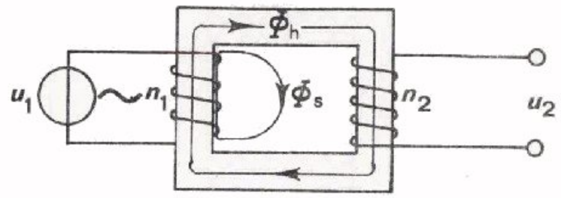
Opmerking.

Hoe hoger de netfrequentie, des te kleiner valt dus de benodigde transformator uit. Om deze reden kiest men de wisselstroomfrequentie in vliegtuigen hoger dan 50 Hz. Dit werkt immers gewichtsbesparend.

DE KOPPELFAKTOR

Bij een ideale transformator is de gehele magnetische flux Φ van de primaire wikkeling gekoppeld met de secundaire wikkeling.

Bij een praktische transformator is dit niet het geval. Een deel van de flux loopt niet door de kern, maar buitenom. Men spreekt van *spreiding*. Het niet gekoppelde veld noemt men *spreidingsveld*



Noemen we de totaal opgewekte flux Φ_{tot}, de gekoppelde flux door de kern Φ_h (= de "hoofdflux") en de spreidingsflux Φ_s, dan geldt:

$$\Phi_{tot} = \Phi_h + \Phi_s.$$

In een transformator, zoals hierboven getekend, is de verhouding van de flux door de secundaire Φ_h en de totale flux Φ_{tot} de *koppelfactor* k.

In formule:

$$\boxed{k = \frac{\Phi_h}{\Phi_{tot}}} \quad \text{of} \quad k = \frac{\Phi_h}{\Phi_h + \Phi_s}$$

Bij een praktische LF-transformator is de spreidingsflux klein; vaak minder dan 1% van Φ_{tot}. De koppelfactor is dus bijna gelijk aan 1.

Als Φ_s 1% is van Φ_{tot}, dan is k = [ ]

Indien k < 1, dan is bij een gegeven wikkelverhouding $n_1 : n_2$ de secundaire spanning kleiner dan:

$$\frac{n_2}{n_1} \cdot u_1.$$

Dan geldt:

$$\boxed{u_2 = k \frac{n_2}{n_1} u_1} \quad \text{en} \quad \boxed{i_2 = k \cdot \frac{n_1}{n_2} \cdot i_1}$$

OEFENING

Van een transformator is $n_1 = 200$ en $n_2 = 1000$. Als $U_1 = 110$ V, dan blijkt $U_2 = 500$ V te zijn. Hoe groot is k?

k = [ ]

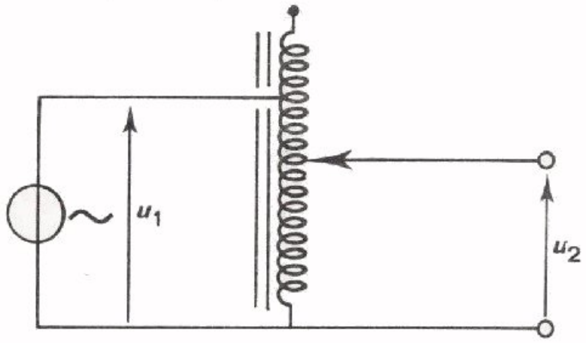
LF-AFSCHERMING

Op het vorige blad zagen we dat een transformator een spreidingsflux Φ_s in zijn omgeving heeft. Dit magnetische spreidingsveld kan storend werken. Er worden in geleiders in de nabijheid inductiestroompjes opgewekt. Dit betekent dat nettransformators b.v. hinderlijke *bromspanningen* veroorzaken. Deze storingen zijn te voorkcmen door de transformator *af te schermen*. Dit kan men doen door de transformator in een kastje van silicium-ijzer onder te brengen. De spreidingsflux Φ_s gaat dan vrijwel geheel door het ijzer van het kastje, zodat buiten het kastje praktisch geen magnetisch wisselveld meer aanwezig is.

De afscherming tegen het spreidingsveld van een transformator is nog beter te maken door zogenaamd *mumetaal* te gebruiken. Dit is ijzer met een zéér hoge μ_r. Het is echter nogal gauw verzadigd en bovendien duur. Daarom brengt men het mumetaal niet om de transformator zelf aan, maar om het onderdeel dat geen last van het magnetische wisselveld mag ondervinden. Het mumetaal is dan verder van het spreidingsveld verwijderd en raakt minder snel verzadigd. De af te schermen onderdelen zijn bovendien als regel kleiner dan de transformator, zodat minder mumetaal vereist is.

DE VARIAC

Een variac is een variabele nettransformator. Hij is meestal uitgevoerd als autotransformator met glijcontact. Bij verplaatsing van dit glijcontact varieert de secundaire spanning. Deze kan groter worden dan de primaire spanning, meestal tot 270 V.



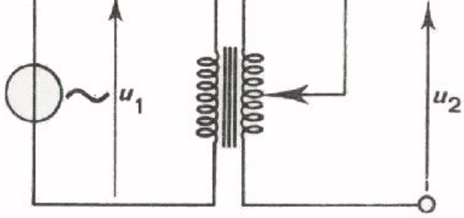
Op volgend blad ziet u enkele uitvoeringsvormen van variac's.

De gelamelleerde ringvormige kern heeft een rechthoekige doorsnede. Hij is gemaakt door één lange strook van siliciumijzer stijf op te rollen. Vervolgens zijn om de kern een aantal windingen van massief koperdraad gewonden. De primaire spanning wordt op de gehele wikkeling of tussen een uiteinde en een vaste aftakking aangesloten. De secundaire spanning wordt afgenomen tussen een uiteinde en het glijcontact. Het glijcontact wordt gevormd door een *koolborstel* die verend kan glijden over de windingen. Op de baan waarover het contact loopt, is de isolatie van de windingen verwijderd. De koperdraad is daar vlak gemaakt en soms verzilverd; dit alles om een goed contact met de koolborstel te verzekeren.

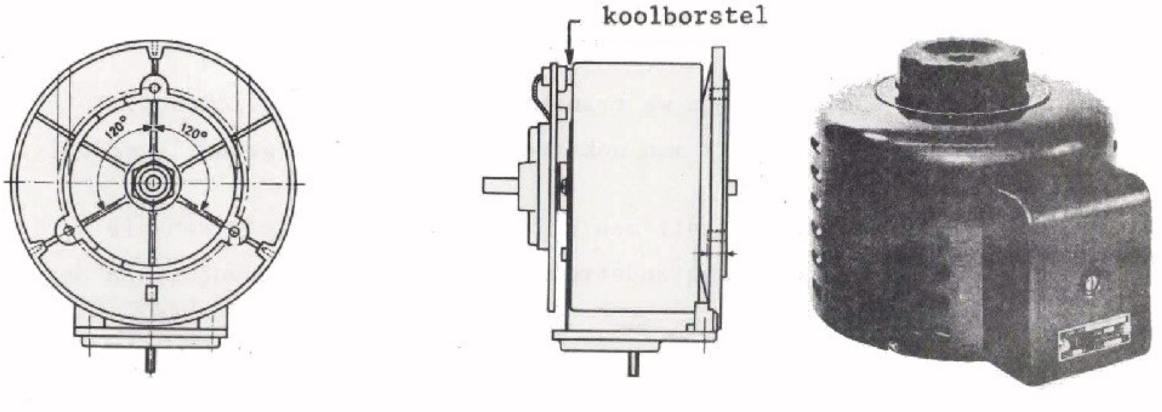
Om meer vermogen te kunnen leveren schakelt men variac's parallel. Zie de laatste afbeelding op volgend blad. De parallel geschakelde variac's worden met één as bediend. Omdat er zelfs bij kleine verschillen tussen de afgegeven spanningen van de afzonderlijke variac's grote kortsluitstromen kunnen gaan lopen, neemt men een smoorspoel op.

Men heeft ook variac's met gescheiden primaire en secundaire wikkeling. Dit heeft als voordeel dat de secundaire en zijn belasting los zijn van het net. Met zo'n variac is het veiliger werken.

Evenals de auto-trafo-variac is de secundaire van een glijcontact met koolborstel voorzien.

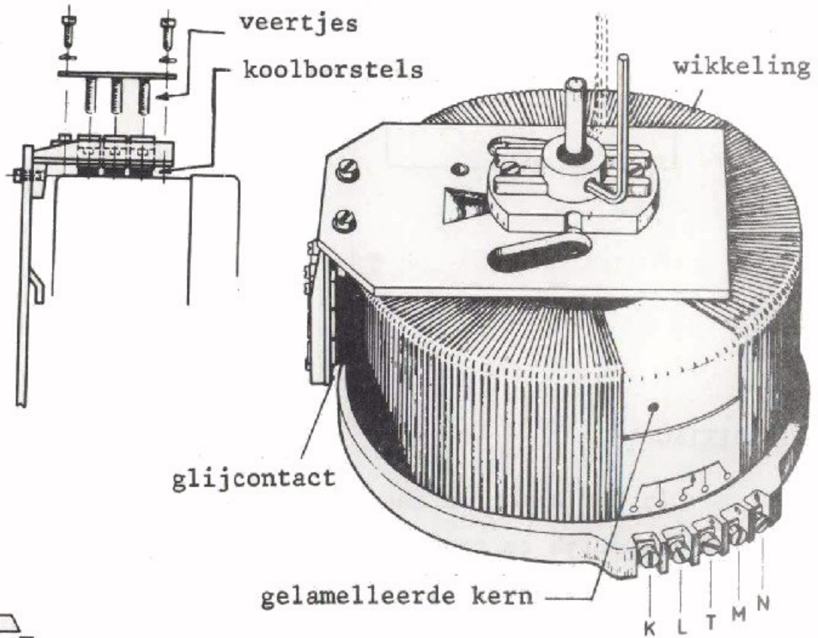


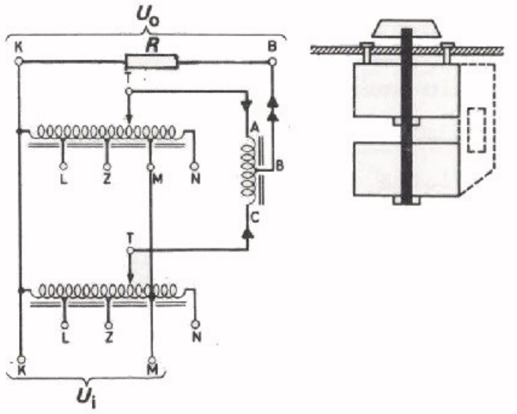
UITVOERINGSVORMEN VAN VARIAC'S.



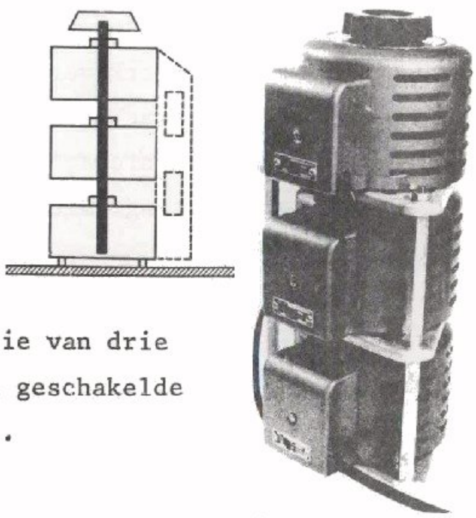
Normale variac, waarbij de stroom aan een vlakke kant van de cylindrische spoel wordt afgenomen.

Grotere variac, waarbij de stroom via drie koolborstels aan de cylindrische buitenzijde wordt afgenomen





Combinatie van twee parallel geschakelde variac's.



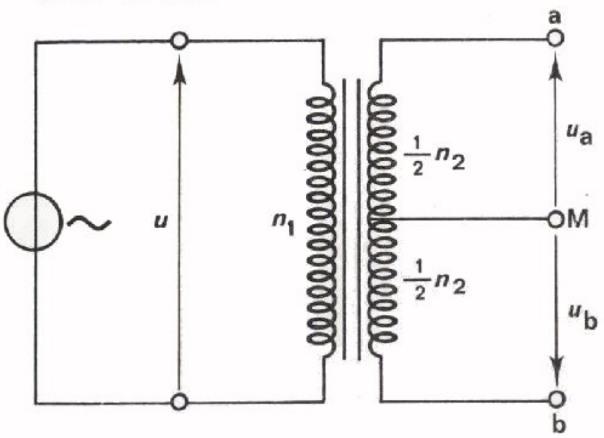
combinatie van drie parallel geschakelde variac's.

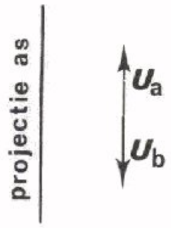
Hiermee worden 2 respectievelijk 3 spanningen tegelijk en in dezelfde mate geregeld.

DE LF-TRANSFORMATOR

Tot nu toe bespraken we transformators voor het lichtnet. Tot frequenties van ca. 20 kHz past men ook transformators met gelamelleerde ijzerkern toe.

In TV-ontvangers treft men bijvoorbeeld LF-trafo's aan die de lijnafbuigspoelen van een zaagtandstroom voorzien. De frequentie van deze stroom is ruim 15 kHz.





Een bijzondere toepassing van een trafo is het verkrijgen van twee even grote wisselspanningen die precies in tegenfase zijn. Dit is te bereiken door de secundaire van een middenaftakking te voorzien. Op het moment dat a maximaal positief t.o.v. M is, is b maximaal negatief t.o.v. M. Verder is:

$$U_{at} = \frac{\frac{1}{2}n_2}{n_1} U_t$$

$$U_{bt} = \frac{\frac{1}{2}n_2}{n_1} U_t.$$

KORTSLUITING

In het algemeen mag men een trafo niet kortsluiten. De stromen worden dan namelijk zo groot dat er zeer grote koperverliezen ontstaan. De trafo wordt oververhit en gaat stuk.
Ook kortsluiting van slechts één winding, doordat b.v. de isolatie plaatselijk onderbroken wordt, doet de trafo sneuvelen. In deze ene winding gaat dan namelijk een zeer grote stroom lopen die de trafo ter plaatse sterk verhit. Daardoor gaat er isolatie in de omgeving kapot en de trafo kan zelfs in brand vliegen.
Sommige trafo's, scheltransformatoren b.v., zijn bestand tegen secundaire kortsluiting. Die zijn zo geconstrueerd, dat:

$$R_i = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 R_1 + R_2$$

zó groot is, dat de trafo zelfs bij kortsluiting niet te heet wordt.

Bij een variac wordt kortsluiting van windingen voorkomen door het glijdende contact niet van koper, maar van koolstof te maken, dat genoeg weerstand biedt.

HF-TRANSFORMATORS

Voor wisselspanningen met frequenties boven 20 kHz kan men transformators met kernen van gelamelleerd ijzer niet goed meer gebruiken omdat de ijzerverliezen te groot worden.

Voor het frequentiegebied tussen 20 kHz en 25 MHz gebruikt men dan ook *ferroxcube* kernmateriaal.
Men kan ferroxcube in twee soorten onderscheiden:

- ferroxcube 3 wordt toegepast in het frequentiegebied van 10 kHz tot ca. 1 MHz.
- ferroxcube 4 wordt toegepast in het gebied van 500 kHz tot ca. 25 MHz.

In het gebied boven 25 MHz geeft men de voorkeur aan poederijzer kernmateriaal.

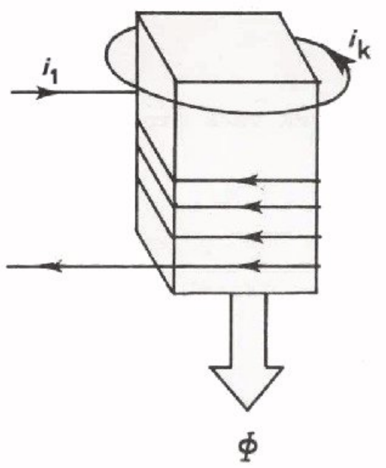
Tenslotte worden bij hoge frequenties ook vaak transformators *zonder kern* toegepast.

Behalve de ijzerverliezen (wervelstroom- en hysteresisverliezen) spelen ook de *koperverliezen* bij HF-transformators een grote rol. Soms wordt met voordeel litzedraad toegepast.

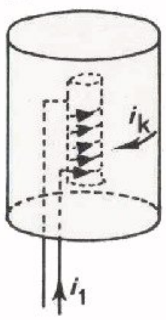
Bij transformators voor hoge en zeer hoge frequenties zijn niet alleen de verliezen van groot belang. Ook de *capaciteit* over de afzonderlijke wikkelingen en die onderling tussen de wikkelingen aanwezig is, speelt een grote rol. De wijze van wikkelen is in verband hiermede van belang. Immers, de ene manier van wikkelen geeft minder capaciteit dan de andere.
Verder wijst de aanwezigheid van capaciteit op de aanwezigheid van een elektrisch wisselveld in de isolatie tussen de windingen. Dit kan bij het gebruik van minder geschikt isolatiemateriaal grote *diëlektrische verliezen* veroorzaken. Het gebruik van goed verliesvrij isolatiemateriaal is dus een punt van belang.

HF-AFSCHERMING

Naar buiten treden van het HF-wisselveld van een transformator voorkomt men automatisch door een ferroxcube potkern toe te passen.
HF-transformators en HF-spoeltjes schermt men ook vaak af door ze onder te brengen in een busje van koper of aluminium. Door deze afscherming wordt in de eerste plaats voorkomen dat het magnetische zowel als het elektrische HF-wisselveld van de transformator of het spoeltje naar buiten treedt. In de tweede plaats komen buiten aanwezige storende elektrische en magnetische HF-velden niet bij de transformator of het spoeltje. Hoe is nu in te zien dat niet-magnetisch materiaal (koper of aluminium) toch afschermt voor HF-magnetische velden?



Stel dat we een ijzeren kern hebben waar een wikkeling op is aangebracht. Bovendien is om deze kern één kortsluitwinding aangebracht. Als we nu een stroom i_1 in de wikkeling laten toenemen, ontstaat hierdoor een ook toenemende flux Φ in de kern. De toenemende Φ induceert in de kortsluitwinding een spanning die de kortsluitstroom i_k doet lopen. Nu is de inductiestroom i_k altijd *tegengesteld* gericht aan de stroom i_1. Dit betekent dat het magnetische veld dat i_k in de omgeving opwekt tegengesteld is aan het veld dat i_1 daar opwekt. In de omgeving van de kortsluitwinding heffen de magnetische velden van i_1 en i_k elkaar vrijwel op. Op deze werking berust de magnetische afscherming van HF-transformators en HF-spoeltjes.



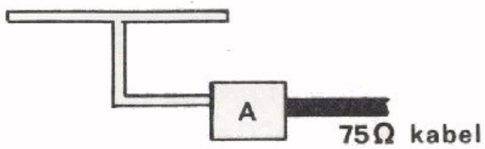
Het om het HF-spoeltje aangebrachte busje van aluminium vormt als het ware een kortsluitwinding. De HF-stroom i_1 in het spoeltje veroorzaakt een HF-inductiestroom in het busje. De HF-wisselvelden van i_1 en i_k heffen elkaar *buiten* het afschermbusje op; binnen het busje wordt het veld van i_1 door i_k tegengewerkt, zodat de zelfinductie van het spoeltje kleiner wordt door het aanbrengen van de afscherming.

Zo zal men buiten het busje weinig merken van het door het spoeltje opgewekte HF-wisselveld.

Op eenzelfde manier kan men uitleggen dat een HF-wisselveld dat buiten het busje aanwezig is, geen uitwerking meer heeft binnen het busje.

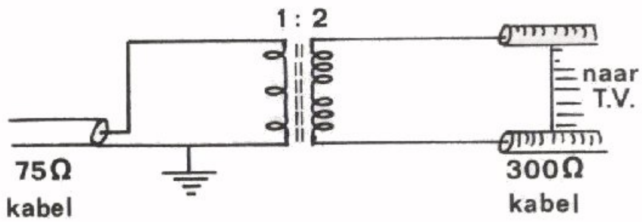
VOORBEELDEN VAN HF-TRANSFORMATORS

We geven twee voorbeelden van HF-transformators.

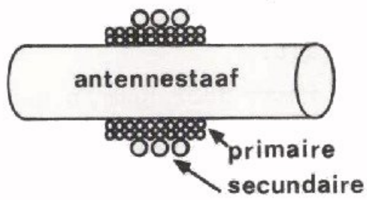


Een TV-antenne voor een centraal antennesysteem geeft een HF-signaal af aan een versterker A.

De versterker voert het signaal aan een 75 Ω - coaxiale kabel toe. Via de kabel komt het signaal in de huiskamers. Daar wordt het van een 75 Ω - kabel aan een 300 Ω - kabel toegevoerd



De transformator bestaat primair uit 3 en secundair uit 2 x 3 windingen op een kern van poederijzer.



Een antennestaaf van een portable radio ontvanger bevat een of twee transformators. Ze bestaan uit twee wikkelingen, waarvan de primaire meestal meer dan 10 x zoveel windingen bevat als de secundaire.

De secundaire bevat bijvoorbeeld 2 of 3 windingen. De antennestaaf is van Ferroxcube.

Hoewel het voor HF-toepassingen steeds moeilijker wordt om de koppelfaktor k dicht bij 1 te krijgen, streeft men er altijd naar k = 1 zo goed mogelijk te benaderen.

Als k = 1 niet meer wordt nagestreefd, spreekt men meestal niet meer van trafo's, maar van *gekoppelde spoelen*.

SAMENVATTING

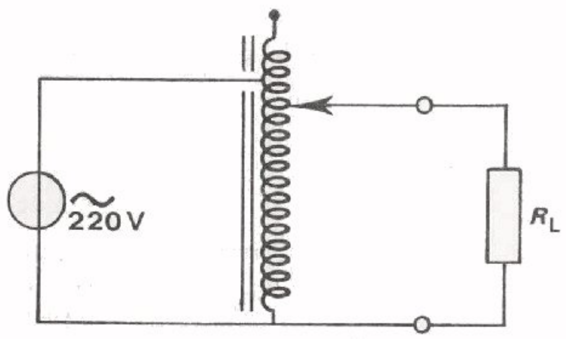
Net-transformators hebben volgende eigenschappen:

- Tussen primaire- en secundaire wikkeling is voor een isolatie gezorgd die 2 kV kan doorstaan.
- De kern is van gelamelleerd silicium-ijzer.
- De transformator wordt aan de primaire zijde beveiligd tegen oververhitting door een smeltveiligheid.
- Het rendement $\eta = \frac{P_{uit}}{P_{ing}} 100\%$ kan uiteenlopen van circa 65% bij kleine transformators tot circa 90% bij grote transformators, daarbij zijn de koperverliezen meestal veel groter dan de ijzerverliezen.
- De inwendige weerstand R_i van de transformator, gezien vanuit de belasting, bedraagt:

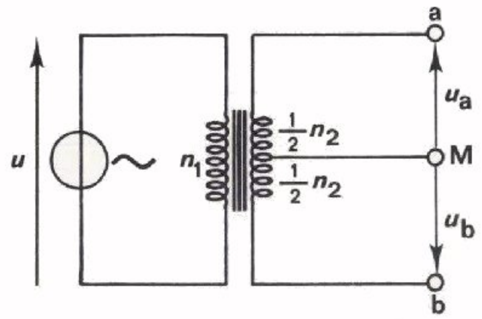
$$R_i = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 R_1 + R_2$$

hierin is: R_1 = koperweerstand van primaire,
R_2 = koperweerstand van secundaire.

- Men mag een transformator *niet* gebruiken voor
  a. een te hoge primaire spanning met behoud van de voorgeschreven frequentie.
  b. een te lage frequentie met behoud van de voorgeschreven primaire spanning.
- Hoe groter vermogen een transformator moet doorgeven, des te groter dienen zijn afmetingen te zijn.
- Kortsluiting van slechts één winding doet de trafo plaatselijk te heet worden, waardoor hij defect gaat.
- Men kan een nettransformator *afschermen* door hem in een kastje van transformator-blik op te sluiten.
- Nog beter is om het af te schermen onderdeel in de buurt van de transformator in een mumetalen kastje op te sluiten.
- Een bijzondere veel toegepaste nettrafo is de *variac*. Dit is een regelbare autotransformator. De secundaire spanning wordt afgenomen van een koolborstel, die beweegbaar is langs de wikkeling van de transformator.

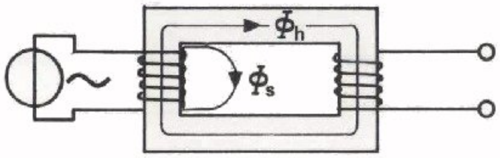


Men heeft ook variac's met gescheiden wikkelingen.



Een veel toegepaste LF-transformator is er een met een secundaire middenaftakking. Op die manier komen twee even grote wisselspanningen ter beschikking, die precies in tegenfase zijn.

$$U_{at} = U_{bt} = \frac{\frac{1}{2}n_2}{n_1} U_t$$



De *koppelfactor* van een transformator is de verhouding van de hoofdflux Φ_h tot de totale flux

$$\Phi_{tot} = \Phi_h + \Phi_s.$$

$$k = \frac{\Phi_h}{\Phi_h + \Phi_s} = \frac{\Phi_h}{\Phi_{tot}}$$

- Van een normale LF-transformator is $k \approx 1$.
- Van een HF-transformator is k doorgaans veel kleiner dan 1.

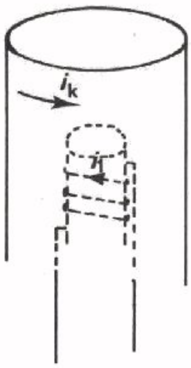
Als kernmateriaal voor transformators gebruikt men:

tot ca. 20 kHz:	gelamelleerd silicium-ijzer
van 20 kHz tot ca. 1 MHz:	Ferroxcube 3
van ca. 0,5 MHz tot ca. 25 MHz:	Ferroxcube 4
boven 25 MHz:	poederijzer.

Bij het transformeren van zeer kleine LF-spanningen kan ook Ferroxcube worden toegepast.

HF-transformators kan men *afschermen* door:

- een Ferroxcube potkern te gebruiken.
- de HF-transformator in een aluminium- of koperen afschermbusje te plaatsen.



De magnetisch afschermende werking van een aluminium afschermbusje berust op:

het *buiten* het busje door i_1 opgewekte veld wordt opgeheven door het *buiten* het busje door kortsluitstroom i_k opgewekte veld.

NAAM: ______ KLAS: ______

OEFENINGEN

1. Een transformator heeft 5% ijzerverlies en 15% koperverlies.

   Hoe groot is het rendement?

   η = ______

2. De koppelfactor van een transformator k = 0,9.

   De primaire spanning bedraagt: 10 V.

   $\frac{n_1}{n_2}$ = 0,1. Hoe groot is de spanning secundair?

   U_2 = ______

3. Welke uitspraak is *niet* juist.

   Mumetaal:

   is snel verzadigd. O

   wordt gebruikt om componenten in de buurt van transformators af te schermen. O

   heeft een hoge relatieve permeabiliteit. O

   wordt als kernmateriaal toegepast. O

B 126

VERBINDINGEN; DE COAXIALE KABEL

INLEIDING

Deze en de volgende les gaat over "verbindingen". Hieronder verstaan we geleiders die componenten of schakelingen elektrisch doorverbinden. Daarbij bespreken we hoe die geleiders met de componenten of schakelingen verbonden moeten worden om elektrische signalen zo goed mogelijk van de ene naar de andere te transporteren.

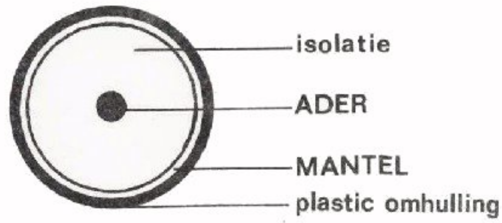
Elk samenstel van twee of meer draadvormige geleiders die onderling geïsoleerd zijn is een kabel. Ook een enkele geïsoleerde geleider noemt men wel een kabel. Het stofzuigersnoer of andere in huis gebruikte snoeren zouden we kabels kunnen noemen. Het is echter gewoonte pas van een kabel te spreken als bijzondere zorg is besteed aan de vorm en de samenstelling van zo'n verbinding. Zo spreekt men over een telefoonkabel, een kabel waarmee een zware motor is aangesloten, een bougiekabel, enz.
Bijzondere aandacht besteden we hier aan de zogenaamde coaxiale kabel die vooral in de hoogfrequent techniek veel toepassing vindt. Deze les is geheel aan de coaxiale kabel gewijd.

DE COAXIALE KABEL

Een coaxiale kabel bestaat uit een massieve draad of snoer, waaromheen een cylindrische isolatie is aangebracht. Deze isolatie is weer omvlochten met koperdraad.

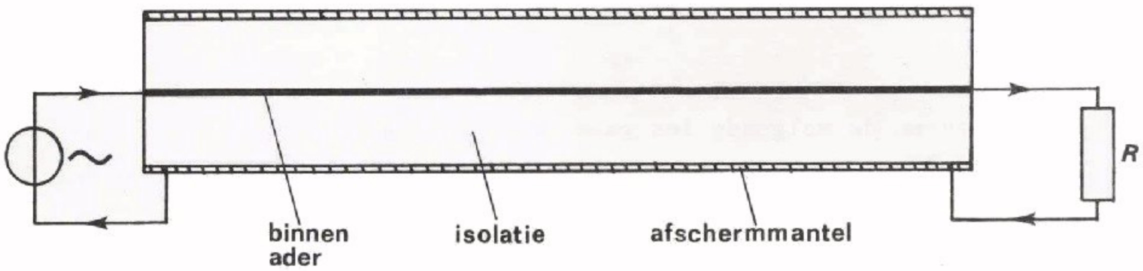
De kabel bestaat zo uit twee geleiders gescheiden door een isolator.
De binnengeleider noemt men: *ader*.
De buitengeleider: *mantel*.

Om de mantel is vaak nog een plastic omhulling aangebracht.



De kabel dankt zijn naam aan het feit dat de geleiders dezelfde (CO) as (AX) hebben.

Hier ziet u een lengtedoorsnede van een coaxiale kabel.



De stroom die de bron via de binnenader aan de belasting *R* toevoert, komt via de mantel weer bij de bron terug.

Voert men via een coaxiale kabel HF-wisselstroom toe aan de belasting, dan bevindt het magnetische en elektrische wisselveld van de kabel zich uitsluitend tussen de ader en de mantel. Dit betekent:

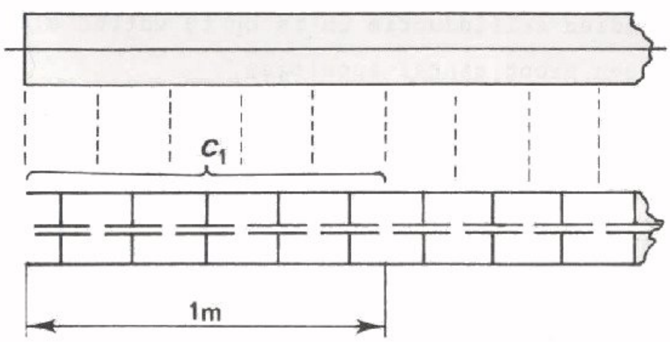
- Een coaxiale kabel geeft geen storend HF-wisselveld naar buiten.

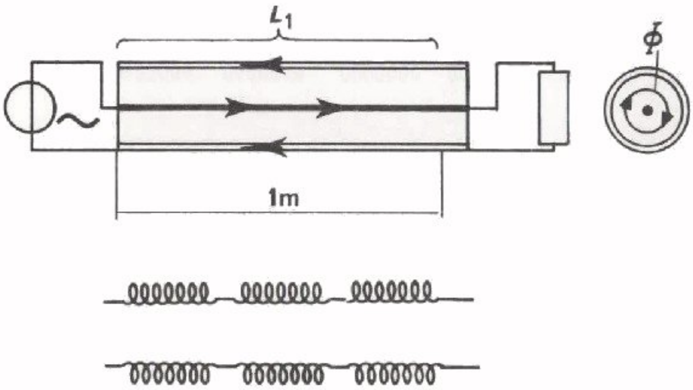
  Vandaar dat men de mantel aanduidt als "afscherm"-mantel.

- Omgekeerd hebben van buitenkomende HF-stoorvelden geen invloed op het signaal dat de coaxiale kabel transporteert.

CAPACITEIT EN ZELFINDUCTIE VAN EEN KABEL.

De ader en de mantel zijn bij een coaxiale kabel geïsoleerd ten opzichte van elkaar opgesteld. Nu vormen twee geleiders gescheiden door een isolator een condensator met een zekere capaciteit. Een coaxiale kabel is dus op te vatten als een langgerekte condensator. Ook kan men stellen dat de kabel als het ware bestaat uit een groot aantal kleine stukjes kabel die achter elkaar staan. Elk klein stukje vertegenwoordigt een klein *C*'tje, terwijl al deze *C*'tjes parallel zijn geschakeld. Voor een kabel geeft men wel op hoe groot de capaciteit C_1 per meter kabellengte is. Deze kan bijvoorbeeld 65 pF bedragen.





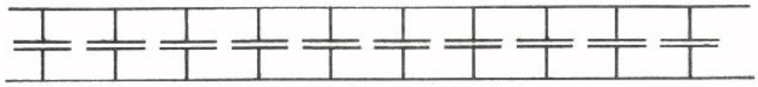
Als een stroom op een bepaald moment de ader binnengaat en via de mantel terugkomt, heeft dit een magnetische flux Φ tussen ader en mantel tot gevolg. Zo zijn de geleiders (ader en mantel) van de kabel gekoppeld met hun eigen magnetische flux. Wordt er een wisselstroom toegevoerd, dan is de kabel gekoppeld met zijn eigen wisselflux die een emk van zelfinductie opwekt. De kabel heeft dus enige zelfinductie.

Elke geleider is voor te stellen als een langgerekte spoel. Ook kan men stellen dat elk klein stukje kabel een kleine zelfinductie L vertegenwoordigt en dat de L's van al deze stukjes in serie staan.

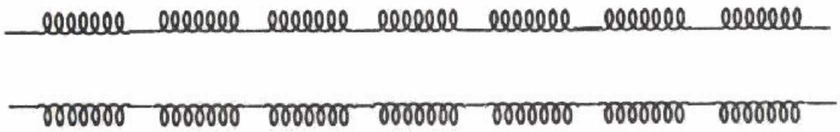
Voor een kabel geeft men wel op hoe groot de zelfinductie L_1 per meter kabel is. Deze kan bijvoorbeeld 0,36 µH bedragen.

Vatten we nu samen:

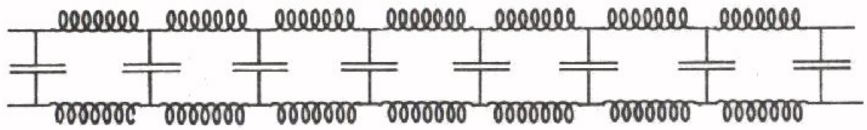
- Een kabel is op te vatten als een groot aantal parallel geschakelde condensatortjes.



- Een kabel heeft bovendien zelfinductie en is op te vatten als een serieschakeling van een groot aantal spoeltjes.



De kabel is nu op te vatten als een combinatie van een groot aantal C'tjes en L-letjes.



Dit beeld van de coaxiale kabel hebben we straks nodig om een paar belangrijke eigenschappen van de kabel te kunnen begrijpen.

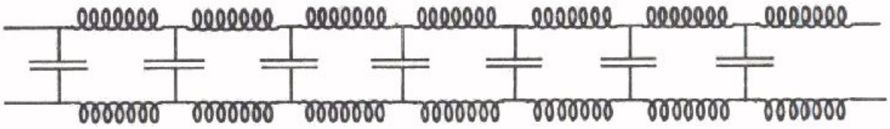
OPMERKING:

Een kabel heeft ook nog ohmse weerstand. Om het eenvoudig te houden verwaarlozen we die voorlopig.

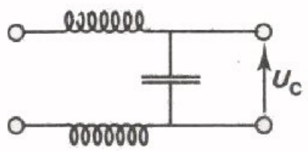
VERTRAGING DOOR EEN KABEL

Als men een elektrische *spanning* op een kabel aansluit waardoor tevens elektrische *stroom* wordt toegevoerd, duurt het even voordat ook aan het uiteinde spanning en stroom aanwezig zijn. De spanning en de stroom verplaatsen zich met grote snelheid langs de kabel.

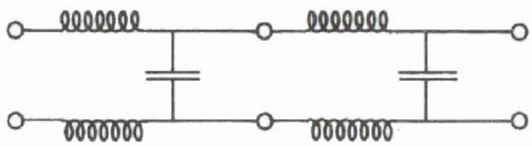
Hoe komt het dat spanning en stroom tijd nodig hebben om zich langs de kabel voort te bewegen? Dit is in te zien door te bedenken dat een kabel als het ware een combinatie is van vele C'tjes en L-letjes.



We hebben al eerder geleerd dat het tijd kost om een condensator te laden. Bovendien leerden we dat het tijd kost om een stroom in een spoel te laten ontstaan.
Kijken we nu eens naar het eerste stukje kan onze kabel. Het duurt even voor de condensator van dit eerste stukje kabel geladen is.



U_c is de ingangsspanning voor het tweede stukje kabel. Het duurt weer even voordat de condensator van dit tweede stukje is geladen, enz. U kunt zich zo voorstellen dat er enige tijd nodig is om een elektrisch signaal langs de kabel te verplaatsen. Nu is die snelheid enorm groot. In geval van luchtisolatie gelijk aan de lichtsnelheid: $c = 3.10^8$ m/s.



Bevindt zich tussen ader en mantel isolatiemateriaal, dan wordt de snelheid kleiner. Is ε_r van dit isolatiemateriaal bijvoorbeeld 4, dan is de snelheid $\sqrt{4}$ maal zo klein als de lichtsnelheid. Dit is dan altijd nog: $1,5.10^8$ m/s.

VRAAG

Hoeveel seconden heeft een elektrisch signaal in dit laatste geval nodig om zich 30 m langs een kabel te verplaatsen?

t = [µs]

DE KARAKTERISTIEKE WEERSTAND

Stel dat we een buitengewoon lange coaxiale kabel hebben, bijvoorbeeld van hier naar de verst verwijderde planeet. Als we aan deze kabel spanning toevoeren, dan wordt er tevens een stroom toegevoerd. Deze stroom gaat achtereenvolgens alle *C*'tjes van de lange kabel laden, terwijl de stroom ook achtereenvolgens in de *L*-letjes gaat lopen.

Het blijkt dat bij een gegeven soort kabel de verhouding van de toegevoerde spanning *U* een stroom *I* constant is bij zo'n buitengewoon lang stuk kabel. Deze verhouding noemt men de *karakteristieke weerstand* R_o.
Dus:

$$R_o = \frac{U}{I} = \text{ingangsweerstand van enorm lang stuk kabel.}$$

De grootte van R_o blijkt af te hangen van de capaciteit per meter en de zelfinductie per meter kabel:

$$R_o = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$$

R_o = karakteristieke weerstand, Ω,
L_1 = zelfinductie per m, H,
C_1 = capaciteit per m, F.

Veel voorkomende waarden van R_o bij coaxiale kabels zijn:
50 Ω, 75 Ω, 135 Ω, 300 Ω.
Meestal is R_o op regelmatige afstanden op de plastic omhulling van de mantel vermeld.

OEFENING

Op blad B126 3 noemden we als mogelijke waarden van de capaciteit en de zelfinductie per meter kabellengte:

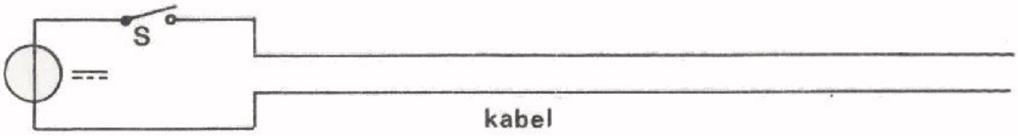
$$C = 65 \text{ pF} \quad \text{en} \quad L = 0{,}36\ \mu\text{H}.$$

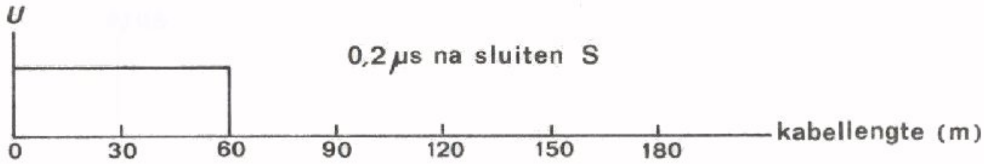
Bereken de bijbehorende waarde van de karakteristieke weerstand:

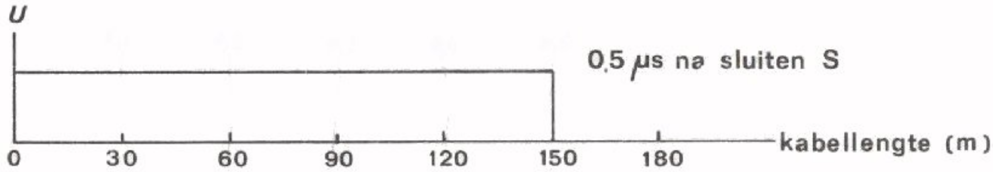
R_o = ☐

REFLECTIES

Als men een gelijkspanning aansluit op een kabel, heeft deze spanning tijd nodig om het einde van de kabel te bereiken. We hebben besproken dat de spanning zich bij een kabel met luchtisolatie verplaatst langs de kabel met een snelheid van 3.10^8 m/s of 30 m per 0,1 µs.
We kunnen nu in een grafiek weergeven waar wel en waar geen spanning op de kabel aanwezig is op een bepaald moment na het aansluiten van *U*.







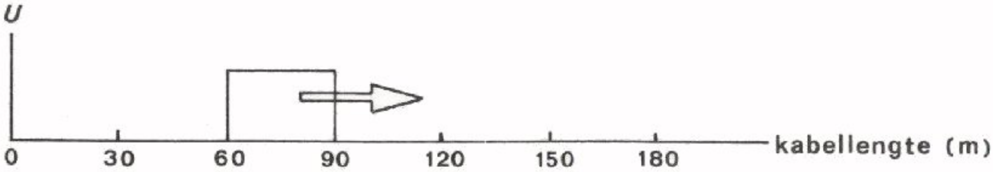
Dit is hierboven gedaan voor twee momenten:

- het moment 0,2 µs na het sluiten van schakelaar S .
- het moment 0,5 µs na het sluiten van S .

Op moment 0,2 µs = 2 x 0,1 µs na het sluiten van S is er spanning aanwezig over een lengte van 2 x 30 = 60 m kabel. Op het moment 0,5 µs = 5 x 0,1 µs na het sluiten van S is er spanning over 5 x 30 = 150 m kabellengte.

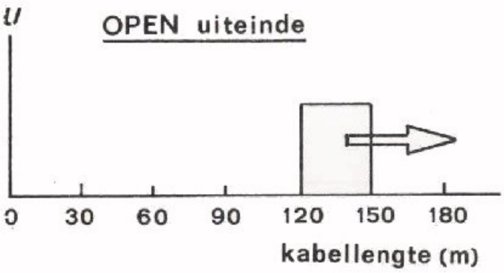
Wordt schakelaar S gedurende 0,1 µs gesloten, dan wordt er een puls de kabel ingestuurd. Dit is hieronder te zien op het moment, 0,2 µs na het weer openen van S.
De puls beweegt zich met een snelheid van 30 m per 0,1 µs naar rechts.

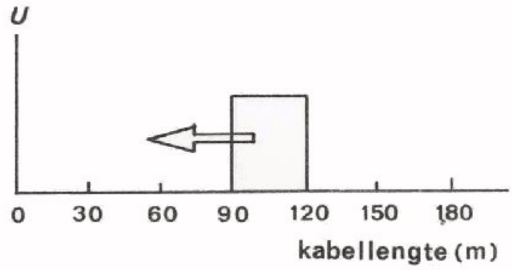
Ter plaatse van de spanningspuls is bovendien in de kabel een overeenkomstige stroompuls aanwezig. De gezamenlijke spannings- en stroompuls vertegenwoordigen een energiepuls $U.I.t$, die zich langs de kabel voortbeweegt. Hierin is t de tijdsduur van de puls, in ons voorbeeld dus 0,1 µs.



Wat gebeurt er nu als de puls bij het eind van de kabel aankomt? Er kunnen zich volgende drie gevallen voordoen.

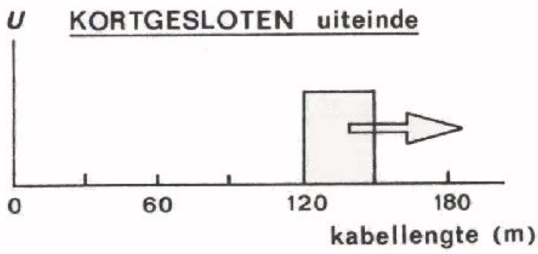
- Op het eind van de kabel is niets aangesloten. We zeggen dat het uiteinde *open* is. De stroom kan echter niet plotseling nul worden.
  Het blijkt nu, dat de puls teruggekaatst wordt. De spanning keert met *dezelfde polariteit* terug naar het begin van de kabel.

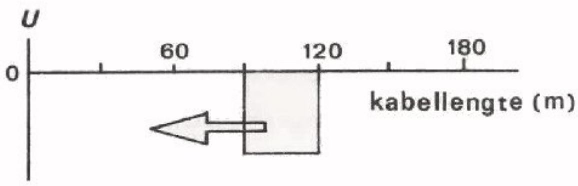




De teruggekaatste puls noemt men een *reflectie.*

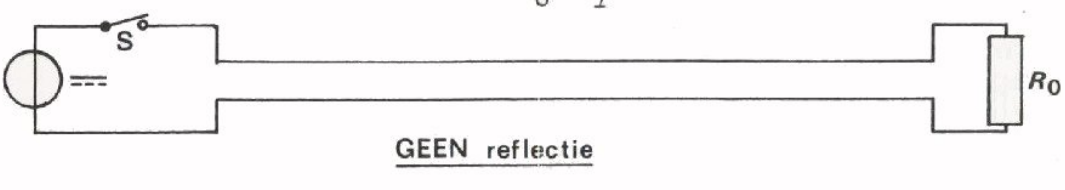
- De kabel is aan het eind *kortgesloten* door ader en mantel met elkaar te verbinden. Ook nu blijkt de puls gereflecteerd te worden. De spanning keert echter met *tegengestelde polariteit* naar het begin terug. In volgende figuur is de reflectie daarom aan de onderzijde van de horizontale as getekend.





- Sluiten we op het uiteinde de karakteristieke weerstand R_o aan, dan treedt er helemaal geen reflectie op. De U-impuls en I-impuls die de kabel in wordt gestuurd, geeft dan heel zijn energie aan R_o af. Voor R_o horen U en I net bij elkaar;

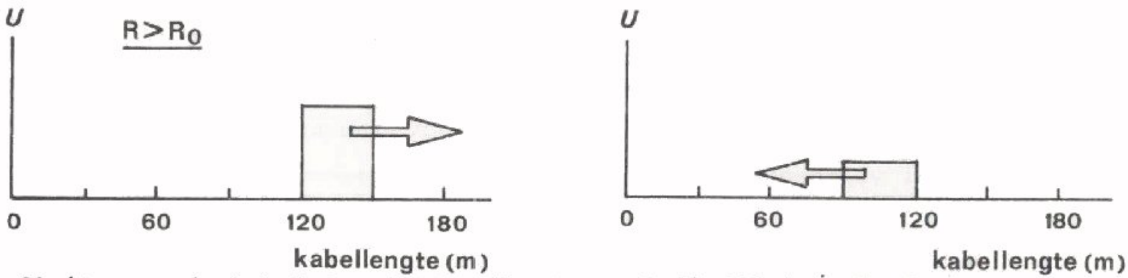
$$R_o = \frac{U}{I}.$$



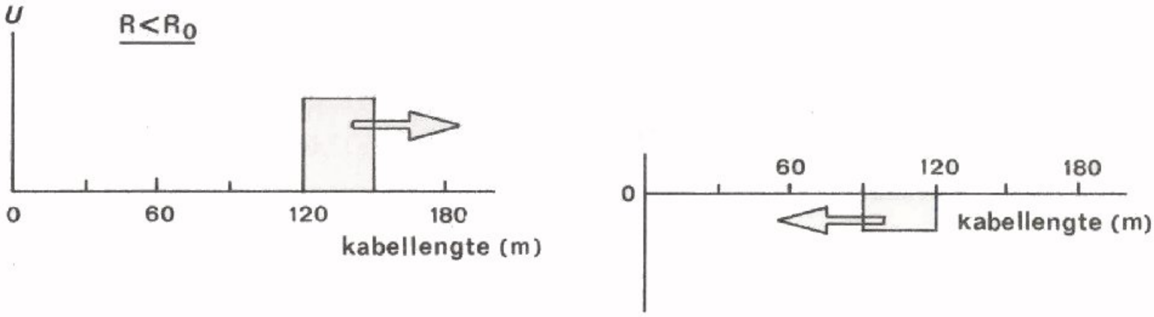
Men spreekt hier van *afsluiten* van de kabel met de karakteristieke weerstand.

Men kan dit ook als volgt zien: Voert men de impuls aan een buitengewoon lange kabel toe, dan zal men niet gauw iets van een reflectie merken omdat de impuls er zo lang over doet om langs die kabel te gaan. De ingangsweerstand van een enorm lange kabel is R_o. Sluit men nu ons stuk kabel met een weerstand $R = R_o$ af, dan is 't net alsof het stuk kabel de impuls doorgeeft aan een buitengewoon lange kabel. En op een reflectie van deze buitengewoon lange kabel kan men lang wachten, die komt niet.

Sluiten we de kabel af met een R die *groter* is dan R_o, dan wordt een deel van de pulsenergie aan R afgegeven. De rest wordt als kleinere impuls met dezelfde polariteit gereflecteerd.



Sluiten we de kabel tenslotte af met een R die *kleiner* is dan R_o, dan wordt ook een deel van de pulsenergie aan R afgegeven. De rest wordt nu als kleinere impuls met tegengestelde polariteit gereflecteerd.
Bedenk dat de maximale energie-overdracht alleen optreedt als $R_i = R_u$.



We vatten dit alles nog eens samen:

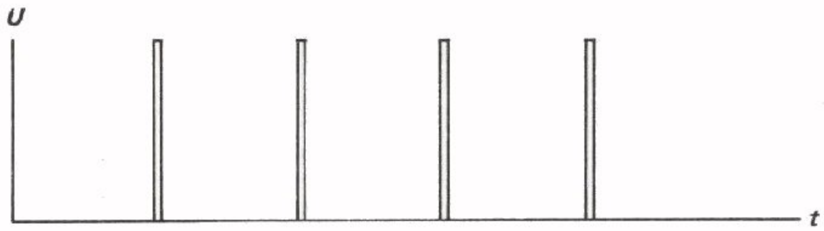
- Als we een spanningsimpuls aan een kabel toevoeren, beweegt deze zich met grote snelheid van het begin naar het einde.
- Is het uiteinde afgesloten met een weerstand die gelijk is aan de karakteristieke kabelweerstand R_o, dan wordt heel de pulsenergie aan afgegeven. Er treedt géén reflectie op.
- Is het uiteinde niet afgesloten met $R = R_o$, dan wordt de gehele impuls of een deel van de impuls gereflecteerd.
- Hoe sterker de grootte van R afwijkt van de waarde R_o, des te groter deel van de impuls gereflecteerd wordt. Als $R = \infty$ (open kabel) of $R = 0$ (kortgesloten kabel), dan wordt de impuls in zijn geheel gereflecteerd.

OPMERKING:

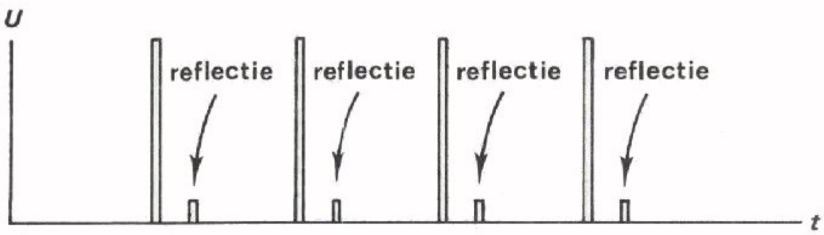
Het feit dat een niet afgesloten kabel reflecties geeft wordt gebruikt bij het bepalen van de plaats waar een kabelbreuk is opgetreden. Door de tijd te meten tussen impuls en reflectie en de kennis over de voortplantingssnelheid van de impuls over de kabel, kan de lengte van het goede stuk berekend worden.

REFLECTIES ZIJN ONGEWENST.

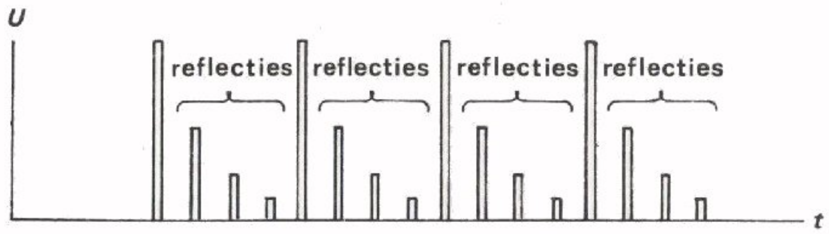
In de elektronica werkt men vaak met pulsvormige signalen. Een TV-signaal bevat bijvoorbeeld een reeks impulsen die dienst doet om de lijnen van het TV-beeld telkens op het juiste tijdstip te laten schrijven. Zo'n reeks impulsen moet dikwijls van een generator via een kabel naar een verbruiker worden overgebracht. Men zorgt er nu voor dat de kabel afgesloten is met een weerstand gelijk aan de karakteristieke weerstand R_0. Dan treden er namelijk geen reflecties op. Men kan zich nu afvragen waarom reflecties ongewenst zijn. Om dit in te zien stellen we ons voor dat we volgend signaal via een kabel moeten transporteren:



Dit signaal kan aan het eind van de kabel voor een deel worden gereflecteerd en naar het begin van de kabel teruglopen. Aan het begin van de kabel kan opnieuw reflectie optreden; dit nu voor een tweede maal reflecterende signaal gaat opnieuw de kabel in. Hierdoor wordt het oorspronkelijke signaal aan het kabeleind grondig bedorven.



Reflecties kunnen zelfs ook weer aan het begin van een kabel optreden, zodat het oorspronkelijke signaal dan op volgende manier verknoeid kan worden:



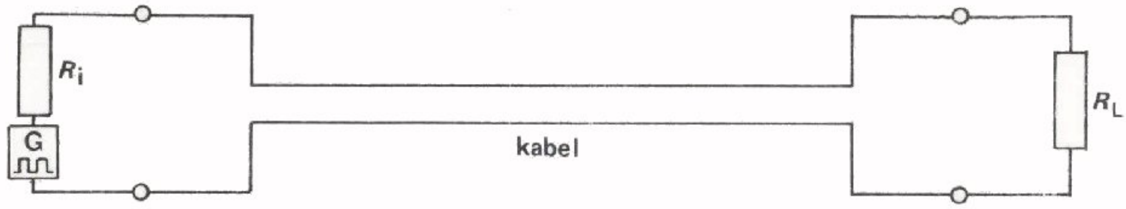
OPMERKINGEN:

Dat de signalen kleiner worden naarmate zij meer gereflecteerd zijn, wordt veroorzaakt door de ohmse weerstand van de kabel.
Een deel van de energie gaat als warmte in de kabel verloren.

Een voorbeeld van de hier bedoelde reflecties hebt u vast wel eens waargenomen op een TV-scherm waar soms meerdere beelden als het ware achter elkaar te zien zijn.

HOE EN WAAR AFSLUITEN?

We hebben gezien dat we reflecties kunnen vermijden door de kabel aan het einde af te sluiten met de karakteristieke weerstand R_o.



Op het vorig blad zagen we echter dat eenmaal aan het eind gereflecteerde signalen bij het begin van de kabel nogmaals gereflecteerd kunnen worden. Men sluit kabels daarom aan het begin ook af met R_o. Dan wordt een reflectie, ontstaan bij niet geheel juiste afsluiting aan het eind van de kabel, aan het begin alsnog geheel onderdrukt.

OPMERKING

- De R aan het kabeluiteinde is in feite de belasting R_L waaraan de kabel zijn signaal moet leveren.
- De R aan het begin van de kabel is in feite de R_i van de schakeling, die het signaal aan de kabel toevoert.

AANPASSING

Het zal inmiddels duidelijk zijn dat men een kabel aan de ingang en aan de uitgang met R_o moet afsluiten. Niet goed afsluiten geeft storingen door reflecties.
Aan het begin moet $R_i = R_o$.
Aan het eind moet $R_L = R_o$.
Als hieraan voldaan is, geldt tevens dat maximaal vermogen wordt afgegeven van generator aan kabel en van kabel aan belasting. Er is aangepast.

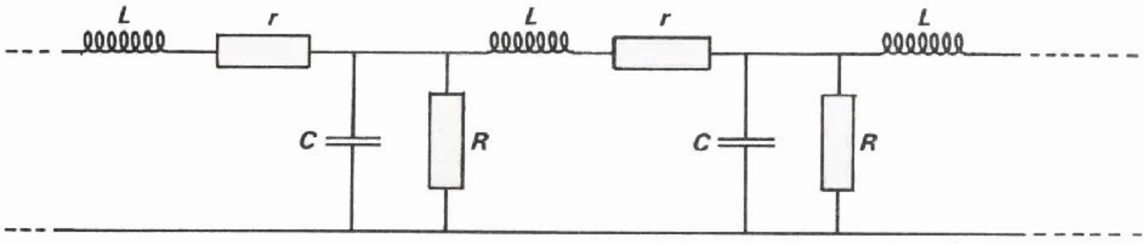
Het zal tevens duidelijk zijn dat men niet zo maar twee kabels met verschillende karakteristieke weerstanden mag doorverbinden. Dan zijn immers beide kabels met een verkeerde weerstand afgesloten. Er is slechte aanpassing.
Men moet dan een aanpassingstrafo gebruiken.

VERLIEZEN IN EEN KABEL.

We hebben al gezien dat de gereflecteerde impulsen steeds kleiner worden. Dit is een gevolg van de zogenaamde ohmse verliezen in de kabel.

De ader van de kabel heeft een kleine ohmse weerstand r die in serie met de L-letjes is te denken.

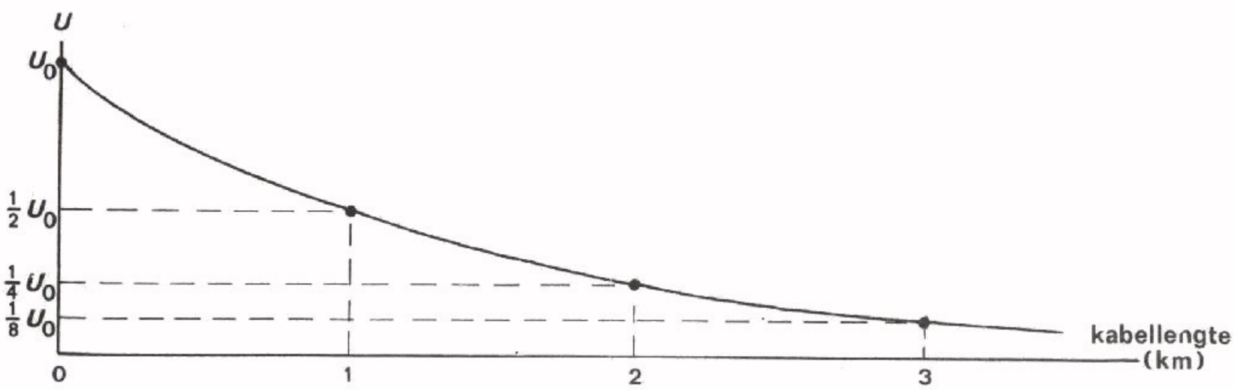
Bovendien is de isolatieweerstand niet ideaal, zodat er ook een grote weerstand R parallel aan de C-tjes is te denken.



De aanwezigheid van genoemde verliesweerstanden maakt dat een langs de kabel gezonden signaal in sterkte afneemt. Dit geld voor de spanning zowel als voor de stroom:

- de uitgangsspanning is kleiner dan de ingangsspanning.
- de uitgangsstroom is kleiner dan de ingangsstroom.

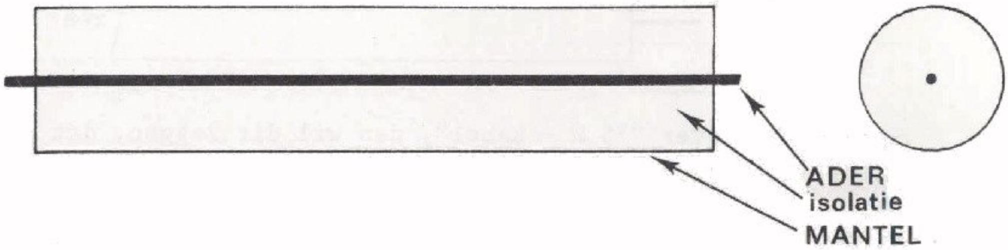
Een deel van het toegevoerde signaal gaat in de kabel verloren in de vorm van warmte. Men spreekt van *kabelverliezen*. De procentuele afname is per zelfde kabellengte constant. Neemt de spanning per 1 km kabel bijvoorbeeld tot op de helft af, dan neemt de spanning over de volgende km tot op de helft van de helft af, enz.



In zeer lange kabels brengt men daarom op bepaalde afstanden versterkers aan.

SAMENVATTING

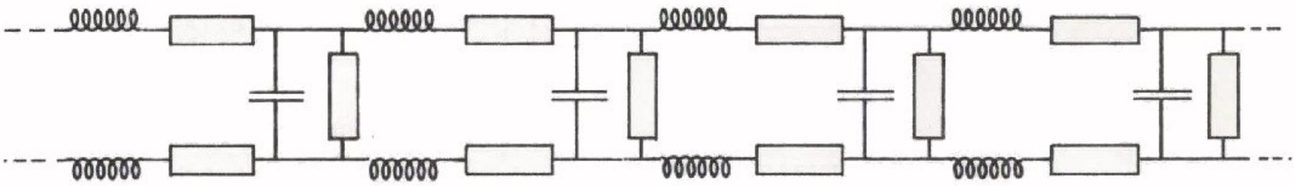
- *Coaxiale kabel* bestaat uit een *binnenader* en concentrisch daaromheen een *afschermmantel*.



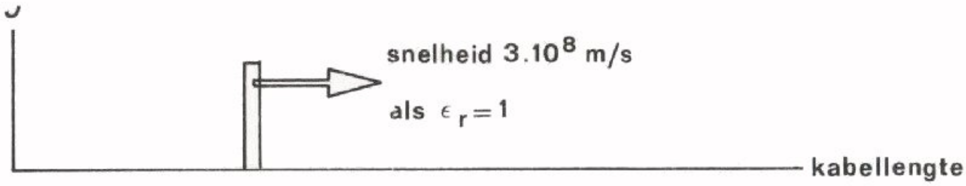
- Een coaxiale kabel heeft:

  capaciteit tussen ader en mantel,
  zelfinductie,
  grote *parallelweerstand* en kleine *serieweerstand*.

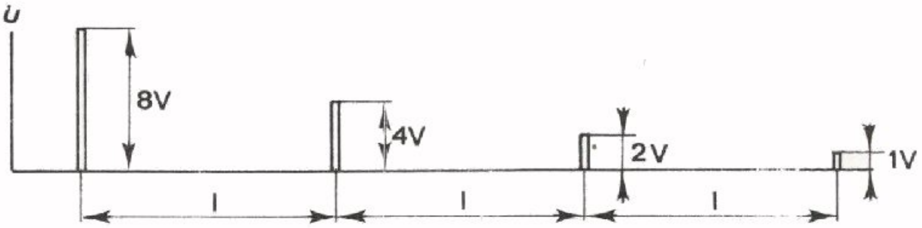
  Dit is schematisch als volgt te tekenen.



- De aanwezige capaciteit en zelfinductie heeft tot gevolg dat een spanningspuls *tijd* nodig heeft om van begin naar eind van een kabel te komen.

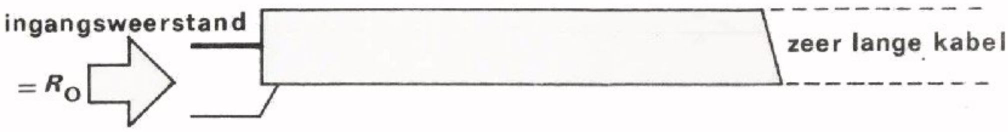


- De aanwezige weerstand heeft tot gevolg dat de grootte van het signaal afneemt als het een lange kabel doorloopt. Men noemt dit de *kabelverliezen*.



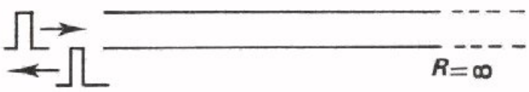
Het signaal halveert per zelfde kabellengte l.

- *De karakteristieke weerstand* R_o van een kabel is de ingangsweerstand van een buitengewoon lang stuk.

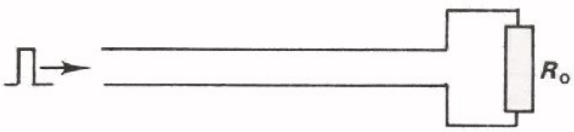


Spreekt men over "75 Ω - kabel", dan wil dit zeggen, dat de R_o van deze kabel 75 Ω bedraagt.

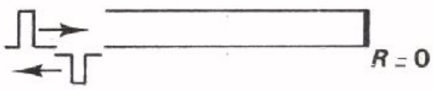
- Kijken we naar de spanning van een puls die een kabel ingestuurd wordt, dan kan deze aan het uiteinde geheel of gedeeltelijk *GEREFLECTEERD* (= teruggekaatst) worden:



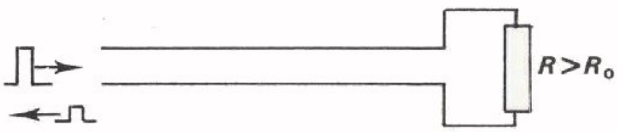
- bij open uiteinde wordt hij met dezelfde polariteit geheel gereflecteerd.



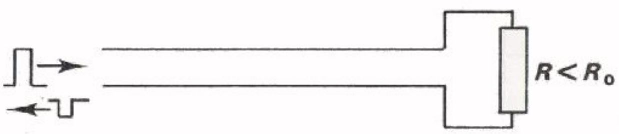
- bij afsluiting met R_o wordt hij *niet* gereflecteerd.



- bij kortgesloten uiteinde wordt hij met tegengestelde polariteit geheel gereflecteerd.

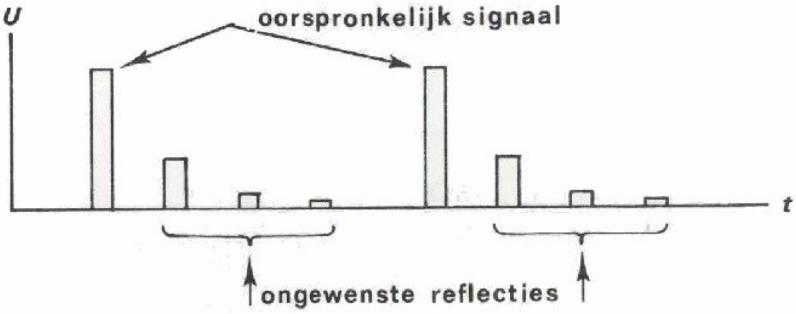


- is afsluitweerstand R groter dan R_o, dan wordt hij gedeeltelijk gereflecteerd.

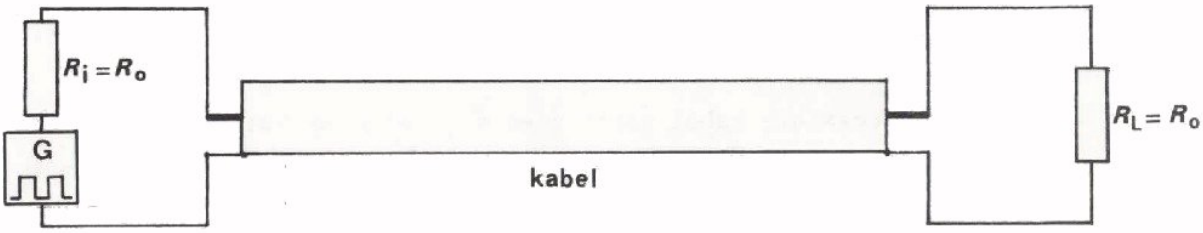


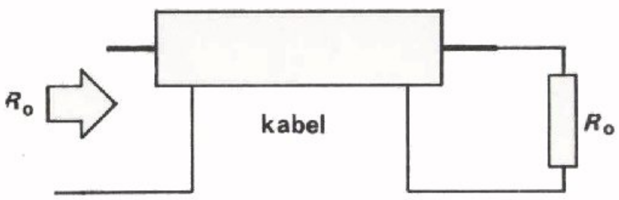
- is de afsluitweerstand R kleiner dan R_o dan wordt hij eveneens gedeeltelijk gereflecteerd.

Het optreden van *reflecties* (= gereflecteerde signalen) is ongewenst, omdat zij bij het gewenste signaal *storing* vertegenwoordigen.



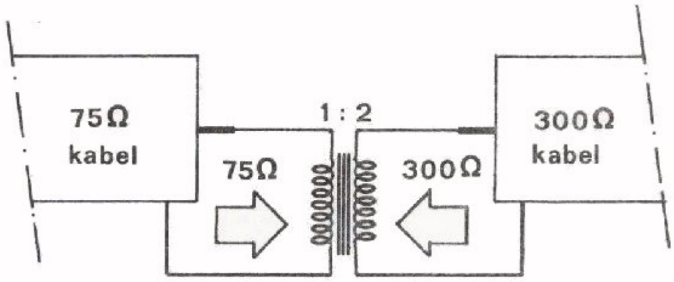
- Reflecties voorkomt men door een kabel aan het einde met R_o af te sluiten. Meestal wordt hij ook aan het begin met R_o afgesloten. Dan worden eventuele toch nog van het einde terugkomende kleine reflecties alsnog onderdukt.





De ingangsweerstand van een met R_o afgesloten kabel bedraagt R_o.

- Kabels met verschillende R_o - waarden mag men niet zo maar doorverbinden, omdat er dan reflecties bij de doorverbinding optreden. Aanpassing is geboden, waardoor elke kabel weer zijn eigen R_o als afsluitweerstand "ziet".



- De karakteristieke weerstand blijkt gelijk te zijn aan:

$$R_o = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$$, waarin: L_1 = zelfinductie per m (H)

C_1 = capaciteit per m (F).

- Een coaxiale kabel geeft geen storing naar buiten en pikt zelf van buiten geen storingen op. Dit dank zij de geaarde afschermmantel.

NAAM: [ ] KLAS: [ ]

OEFENINGEN

1. Een coaxiale kabel heeft per meter een
   zelfinductie L_1 = 0,72 μH en een
   capaciteit C_1 = 8 pF.

   Met welke weerstand moet men deze kabel aan het einde afsluiten om reflecties te voorkomen?

   R_o = [ ]

2. Bij een zeer lange telefoonkabel staat aan het begin een spanning van 40 V. Na 2 km is de spanning nog maar 32 V. Welke spanning zal U meten op een afstand van 6 km van het begin?

   U = [ ]

3. Een 135 Ω - coaxiale kabel is aan het begin afgesloten met 135 Ω en aan het eind met 270 Ω. Men voert één positieve spanningsimpuls aan de kabel toe.

   Er treedt in het geheel geen reflectie op. O

   Aan het eind wordt een spanningsimpuls negatief gereflecteerd. O

   Aan het eind wordt een spanningsimpuls positief gereflecteerd. O

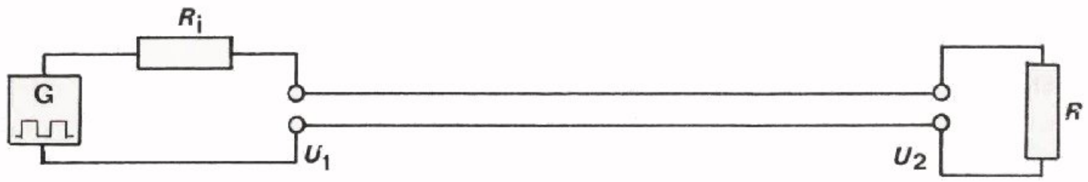
   Aan het eind treedt reflectie op, daarna aan het begin ook weer, enz. O

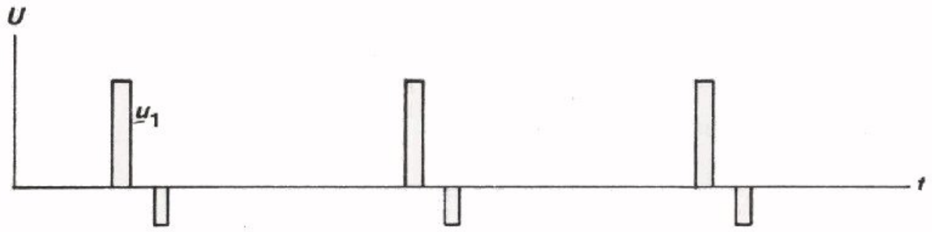
4. De voortplantingssnelheid van een signaal op een coaxiale kabel bedraagt $1{,}2.10^8$ m/sec. Aan de ingang van de kabel wordt een reflectie gemeten op 1,8 μs van de ingangsimpuls.

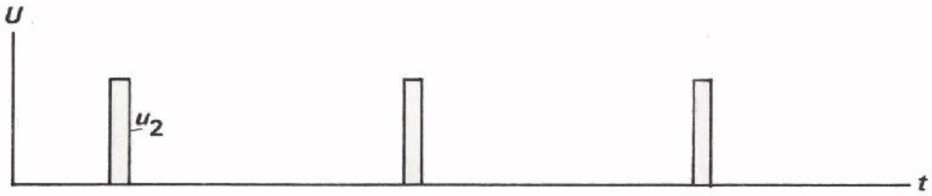
   Hoever is het eind van deze kabel-de kabelbreuk-van de ingang verwijderd?

   l = [ ]

5. Aan een coaxiale kabel wordt een impulsreeks toegevoerd.
Als aan begin en einde van de kabel de spanningen U_1 en U_2 ontstaan, hoe staat het dan met de afsluiting aan begin en einde van de kabel?







Aan de ingang geldt:	$R_i < R_o$	O
	$R_i = R_o$	O
	$R_i > R_o$	O
Aan de uitgang geldt:	$R < R_o$	O
	$R = R_o$	O
	$R > R_o$	O

B 127

V E R B I N D I N G E N

INLEIDING

In de vorige les is een heel bijzondere verbinding ter sprake geweest, de coaxiale kabel.
In deze les worden verbindingen in het algemeen behandeld.

We merken op dat het werk van een bedrijfselektronicus vaak voor een groot deel bestaat uit het leggen van goede verbindingen. Het onderwerp van deze les is dus voor hen van groot belang.
Anderzijds is het natuurlijk zo, dat u een dergelijk praktisch onderwerp niet op papier kunt leren.
De bedoeling is dan ook alleen u netjes op een rijtje wat theoretische achtergrondkennis te geven over verbindingen.

- Neem deze les aandachtig door.
- Denk daarbij steeds aan uw eigen praktijk.
- Probeer niets van buiten te leren.

OVERZICHT

Bij het tot stand brengen van verbindingen hebben we met drie dingen te maken:

- *De geleider.*

  Deze kan zijn:

  - van massief koperdraad.
  - soepele streng, bestaande uit meerdere dunne koperdraden.
  - litze draad, bestaande uit een groot aantal onderling geisoleerde koperdraden.
  - printspoor.
  - geïsoleerde draad.
  - éénaderig snoer.
  - meeraderig snoer, zonder of met afscherming.
  - coaxiale kabel; lint-kabel.

- *De bevestigingsmethode*

  Verbindingen kan men tot stand brengen door:

  - solderen met bout.
  - dompelen in een soldeerbad.
  - schroefverbindingen.
  - klemverbindingen met kabelschoenen of klemmen.
  - draadwikkelverbindingen ("wire wrap").

- *De wijze waarop geleiders gelegd worden.*

  In een elektronische schakeling kan men de geleiders die componenten of delen van de schakeling onderling verbinden, niet maar willekeurig aanbrengen. Men moet het zo doen dat de goede werking van de schakeling niet verstoord wordt.

Elk van deze punten komen in deze les achtereenvolgens aan de orde.

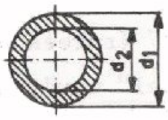
GELEIDERS

We gaan eerst in op de verschillende soorten geleiders die men in de praktijk gebruikt. We doen dit aan de hand van een aantal tekeningen op volgende bladen.

ISOLATIE EN BESCHERMINGSMATERIAAL.

POLYVINYLCHLORIDEBUIS K558

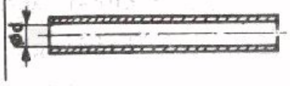
kleur
grijs



d_1 nom	1	2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13
d_2 nom	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12

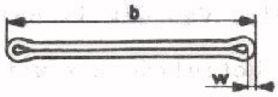
FIBERGLASKOUS DUBBELWANDIG 650° C-2000V K141

d
2,15 3,75 7,46 12,7



POLYVINYLCHLORIDE KRIMPBUIS

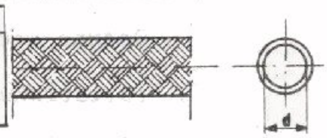
kleur
grijs



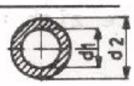
b nom	12	18	26	38	50	70
w nom	0,25		0,5			0,75
te krimpen om een diameter	4,5 t.m. 7	7 t.m. 10	10 t.m. 15	15 t.m. 22	22 t.m. 29	29 t.m. 40

GEVLOCHTEN ISOLATIEKOUS

d
6 12 18 25



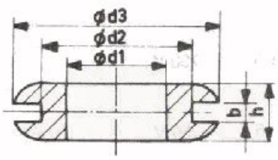
ISOLATIEBUIS



d_1 nom	0,5	0,8
d_2 nom	1	1,3

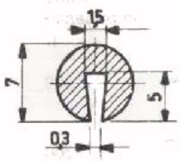
DOORVOERTULES

zwart



d_1 ±0,2	b ±0,2	voor plaatdikte	d_2*	d_3	h
3,5	1	1 t/m 2	5	7	4
4,5	1 2	1 t/m 2 2 t/m 3	6	9	4 6
5,5	1 2	1 t/m 2 2 t/m 3	8	11	4 6
7	1 2	1 t/m 2 2 t/m 3	10	14	4 6
9	1 2	1 t/m 2 2 t/m 3	13	18	5 6
11	1 2	1 t/m 2 2 t/m 3	16	22	5 6
13	1 2	1 t/m 2 2 t/m 3	20	26	5 6

SIERBAND



Op dit blad staan enkele voorbeelden van isolatiebuis, en -kous. Dit kan om al of niet blanke geleiders worden aangebracht. Een bijzondere soort is de PVC-krimpbuis. Deze kan eerst om een of meer geleiders aangebracht worden; daarna kan men hem door verhitting laten krimpen. Op die manier komt hij mooi strak om de geleider(s) te zitten.

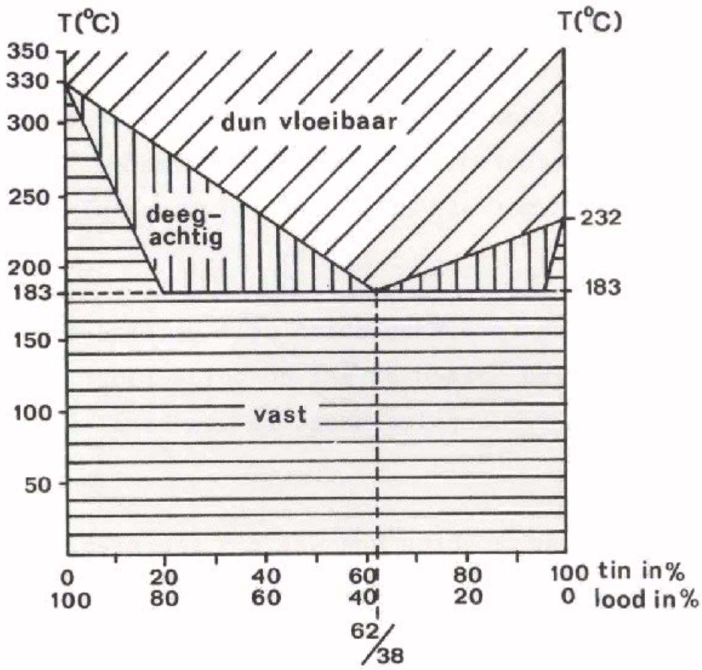
Verder treft u rubber doorvoertules aan. Deze dienen om draad dat door een gat in een metalen plaat wordt gevoerd, te beschermen. De sierband kan hiertoe dienen bij zeer grote openingen. Bovendien is deze band geschikt om op de scherpe randen van metalen platen te worden aangebracht.

SOLDEREN

We hebben verschillende soorten draad, snoer en kabel de revue laten passeren. We gaan vervolgens kijken naar manieren om leidingen te bevestigen.

Een van de oudste methoden is *solderen*. Hierbij maakt men verbindingen van twee metalen onderdelen door middel van een metaal met een laag smeltpunt. Het materiaal waarmee men soldeert is meestal geen zuiver metaal, maar een mengsel (legering) van verschillende metalen. De verbinding ontstaat doordat de oppervlakken van de metalen als het ware "oplossen" en legeren (zich vermengen) met het vloeibare soldeer. Na afkoeling ontstaat dan één geheel.

Voor het tot stand brengen van soldeerverbindingen gebruikt men in de elektronica een *zacht soldeer*, meestal een legering van tin en lood. Een "zacht" soldeer is een soldeer met een laag smeltpunt.



Hiernaast vindt u in een grafiek uitgezet hoe de vaste, deegachtige en vloeibare toestand afhangt van het percentage aan tin en lood, en van de temperatuur. Het toegepaste soldeer heeft meestal een tin - lood verhouding in de buurt van 60 : 40, zodat het bij ongeveer 185°C dun vloeibaar wordt.

Bij een andere tin/lood verhouding is de overgang tussen dun vloeibaar en vast niet zo plotseling.

Bij het solderen is een *vloeimiddel* nodig om:

- oxydatie te voorkomen.
- het soldeer gemakkelijker langs het metaaloppervlak te laten vloeien.

Zonder vloeimiddel is goed solderen praktisch onmogelijk. Veel vloeimiddelen tasten de te solderen metalen aan, hars echter niet. Daarom gebruikt men bij elektronische soldeerverbindingen altijd *hars*. Het soldeerdraad is gewoonlijk zelf al van een harskern voorzien.

Voor het solderen gebruikt men een elektrisch verhitte *soldeerbout*. Men heeft bouten voor hoge spanning (220 V of 110 V) en voor lage spanning (beneden 42 V). Het enige voordeel van een hoogspanningsbout is dat er geen trafo nodig is om hem te gebruiken.
Laagspanningsbouten hebben volgende voordelen:

- Ze zijn veiliger: ongevaarlijk lage spanning.
- Ze zijn eenvoudig geschikt te maken voor zwaarder en lichter werk door de trafo van verschillende aftakkingen te voorzien. (6 V - 7 V - 8 V - 9 V bijvoorbeeld).
- Betere warmte-overdracht van verwarmingselement naar soldeerstift, omdat er weinig isolatie nodig is.
- Geschikter voor continu gebruik, omdat de weerstanddraad van het element dikker is. Men kan de bout de hele dag aan laten staan.

De koperen stift van een soldeerbout is meestal bedekt met een zeer dun ijzeren laagje, dat op zijn beurt weer met cadmium is bedekt. Dit dient om inbranden van de stift te voorkomen. Men mag de stift *nooit* ter reiniging met een scherp voorwerp afschuren, omdat het beschermende laagje anders beschadigd wordt. Afvegen met een natte doek of spons als de bout heet is kan men het beste doen.

Alvorens te solderen dienen de te verbinden delen zelf vertind te zijn. Niet vertinde delen kunnen vertind worden óf met de soldeerbout, óf door ze in een pot met vloeibaar tin te dompelen nadat ze van hars zijn voorzien.

De soldeerboutpunt wordt vaak van te voren van wat tin voorzien. Hierdoor wordt de aanraking met de soldeerplaats groter, zodat gemakkelijke warmte wordt toegevoerd.

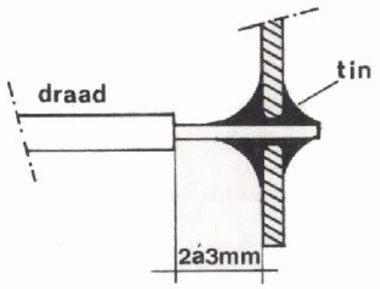
Het solderen zelf geschiedt als volgt:

- Soldeerstift in kontakt brengen met soldeerplaats.
- Soldeerdraad erbij brengen zodat deze de soldeerplaats vlak bij de stift goed raakt.
- Als de soldeerplaats heet genoeg is, vloeit eerst de hars en daarna het soldeer. Niet te veel soldeer aanbrengen!
- Soldeerdraad wegnemen en soldeerplaats nog even naverhitten, zodat het soldeer goed vloeit.
- Direkt daarna soldeerbout wegnemen.

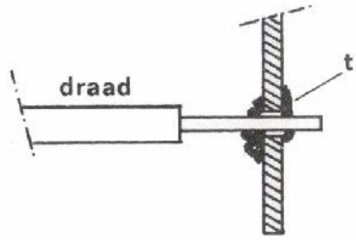
Tijdens het solderen mogen de onderdelen *niet* bewogen worden. De las mag niet geforceerd gekoeld worden. De soldeerverbinding mag niet gecontroleerd worden door eraan te trekken, terwijl hij naderhand niet onder mechanische spanning mag komen te staan.

Het soldeertin mag geen harsresten vertonen; tin met hars erin wijst erop dat de soldeertemperatuur te laag is geweest. Wel zal er hars om de soldeelplaatsen heen aanwezig zijn.

- Soldeertin moet tegen de delen zijn "opgekropen" en de omtrekken van de delen moeten nog goed te zien zijn.
- Het soldeertin moet er glimmend glad uitzien, zonder slakken, kraters, scheurtjes, enz.



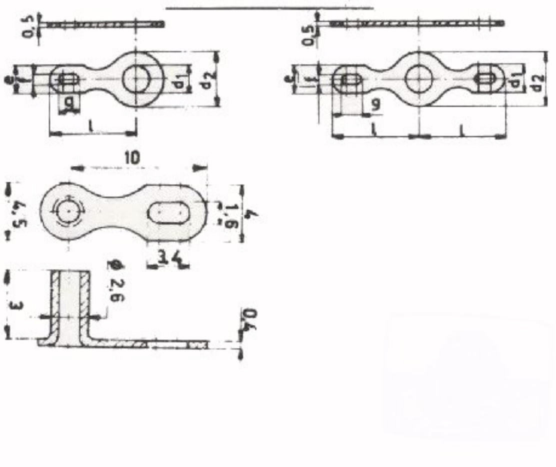
GOED



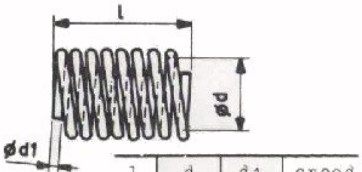
FOUT

Zeer veel soldeeraansluitingen bestaan uit een lip met oog. Hieronder ziet u enkele voorbeelden van soldeerlippen. Draden verbindt men onderling wel met behulp van lasveren (soldeerveertjes). Deze mogen niet groter zijn dan nodig is. Het veertje dient vol met tin te lopen en de tin moet goed gevloeid zijn.

SOLDEERLIPPEN



LASVEREN

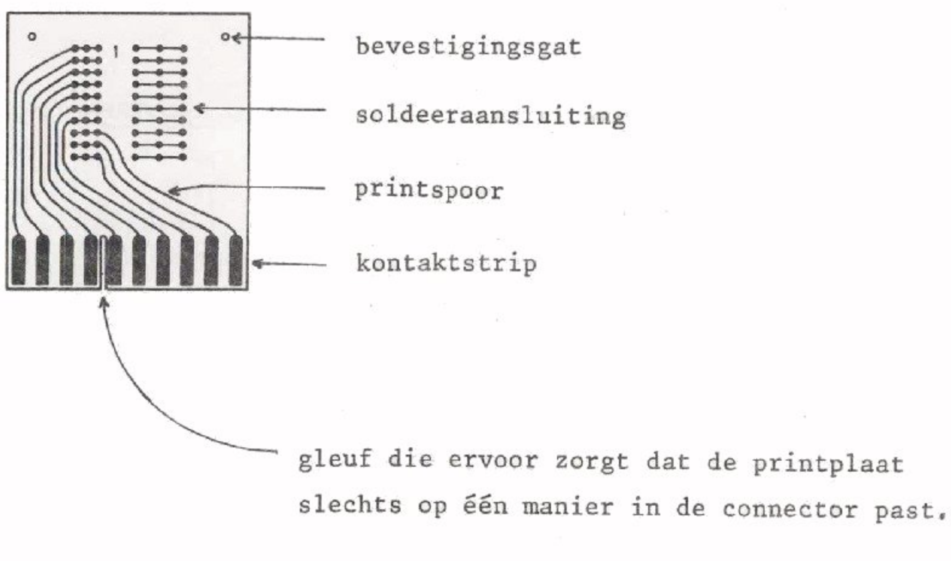


l	d	d1	spoed
5	1,6	0,3	0,5
5	3	0,5	0,8
6	2,2	0,5	0,8
8	4	0,5	0,5
13	5	0,5	0,5



Van belang is ook om erop te wijzen dat menige component niet te heet mag worden. De fabrikant van de component geeft hierover voorschriften. Voorbeelden zijn diverse condensatoren en halfgeleiders (diodes, transistors). Te warm worden tijdens het solderen voorkomt men wel door het te solderen aansluitdraadje tussen soldeerplaats en de component met een pincet of tangetje vast te pakken. Een groot deel van de tijdens het solderen toegevoerde warmte vloeit dan via pincet of tangetje af zonder de component zelf te bereiken.
In sommige gevallen zal men voor het solderen eventueel een speciale legering, *woodmetaal*, gebruiken. Dit soldeer smelt reeds bij 70^{0}C. De temperatuur mag dan echter tijdens het bedrijf van de elektronische schakeling zeker niet aan 70^{0}C toekomen!

Tegenwoordig maakt men veel gebruik van voorgedrukte bedrading. De geleiders zijn dan van te voren op *printplaten* aangebrachte *printsporen*. De componenten verbindt men met de printsporen door solderen met een bout. Zo mogelijk zal men de *dompelmethode* toepassen. De componenten bevinden zich alle aan de ene zijde van de printplaat en steken met hun verbindingsdraadjes door de plaat heen. Aan de andere zijde bevinden zich de printsporen. De plaat wordt eerst enigszins verhit en daarbij aan de printspoorzijde door opdampen van hars voorzien. Daarna wordt de printspoorzijde even in een bak met vloeibaar tin gedompeld, waardoor in één keer alle soldeerverbindingen tot stand komen.



KLEMVERBINDINGEN

Tegenwoordig gaat men er steeds meer toe over om in plaats van solderen een klemverbinding tot stand te brengen. Dit omdat het veel sneller werkt, terwijl de verbinding bovendien van betere kwaliteit kan zijn.
Een *klemverbinding* is een verbinding waarbij het kontakt door mechanische druk tot stand komt. Daarbij is te onderscheiden een verbinding door:

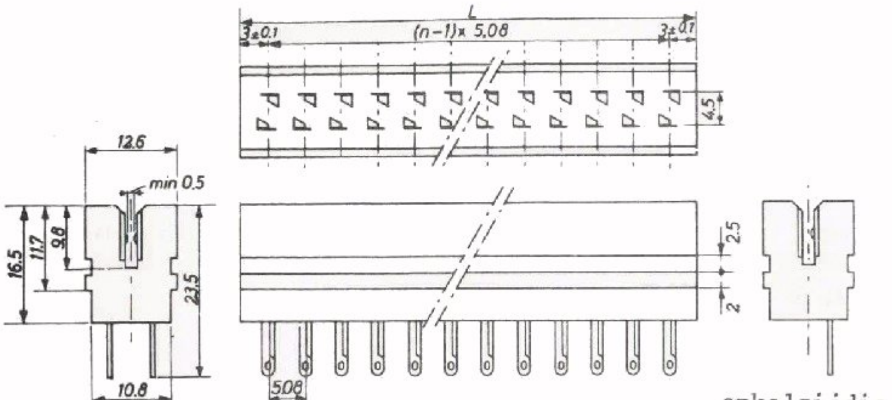
- veerdruk (pen en buskontakten),
- vastschroeven,
- speciale klemming,
  - AMP-verbinding
  - WIRE WRAP-verbinding

VEERDRUKVERBINDINGEN

Dit zijn verbindingen waarbij een of meer pennen in één of meer buskontakten worden gestoken, steker en contrasteker. Men treft ze in talloze uitvoeringen aan. Denk bijvoorbeeld aan de zogenaamde bananensteker en de bijbehorende bus. Meestal is het buskontakt, soms de pen, verend uitgevoerd. Het zijn in wezen verbindingen die men gemakkelijk kan onderbreken en snel opnieuw tot stand brengen.

Stekers en contrastekers met vele verbindingen, zoals men b.v. bij printplaten gebruikt, noemt men *connectors*. De verbinding van draad met connector kan een soldeer- of een klemverbinding zijn.
Meestal past men klemverbindingen toe, in het bijzonder wire-wrap-verbindingen, waarop we naderhand nog terugkomen. Op volgende twee bladen vindt u een paar voorbeelden van connectors en printplaten, een chassis waarin ze kunnen worden aangebracht, en een uit contrasteker en steker bestaande connector.

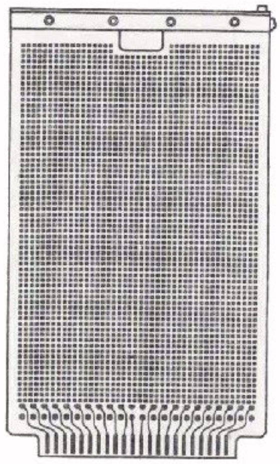
CONNECTOR - PRINTPLAAT



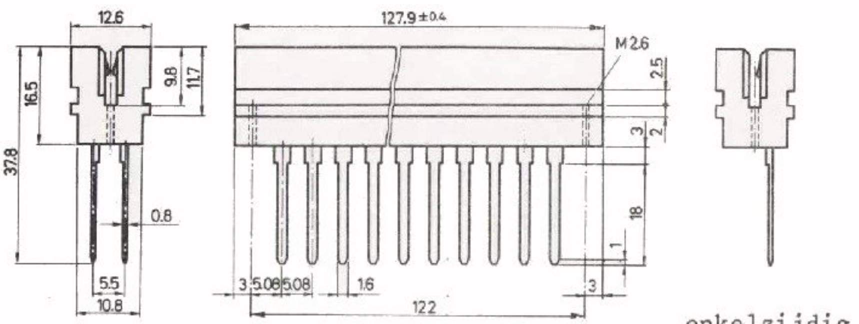
Tweezijdig connector met soldeerpennen

enkelzijdig

Connector met soldeerlippen



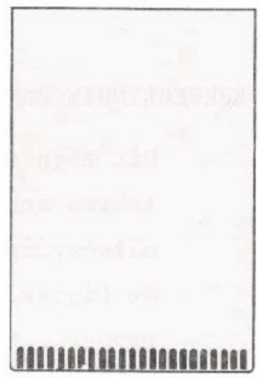
Printplaat



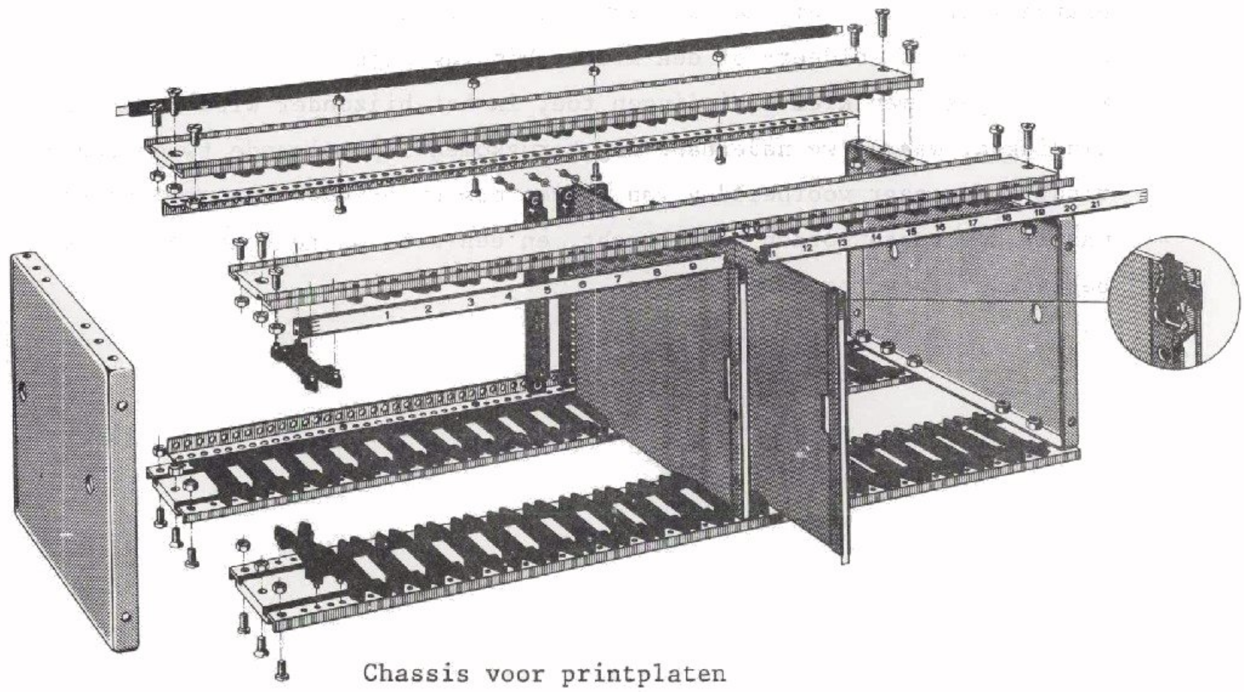
Tweezijdig

enkelzijdig

Connector met wire-wrap-pennen

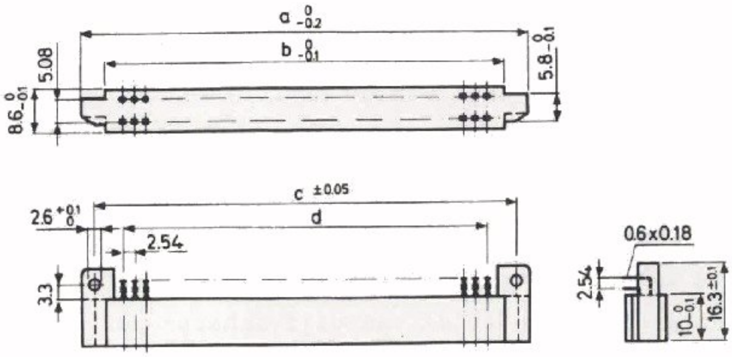


Printplaat

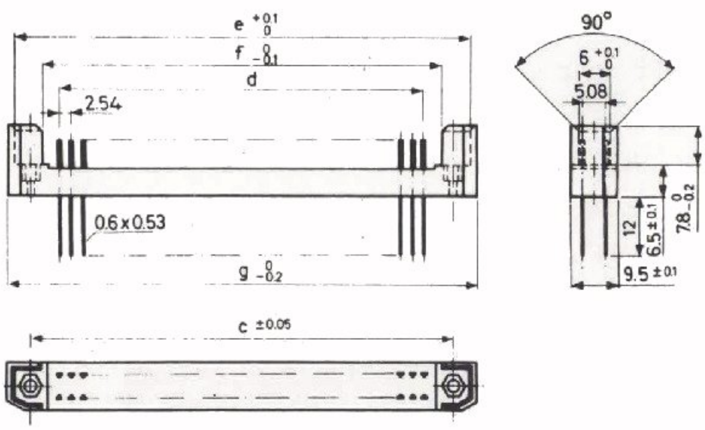


Chassis voor printplaten

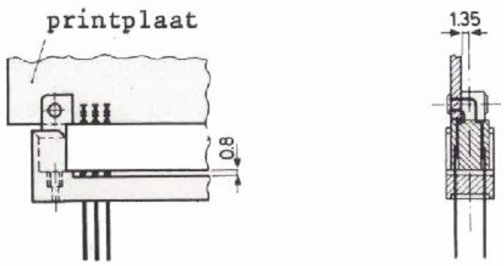
CONNECTOR

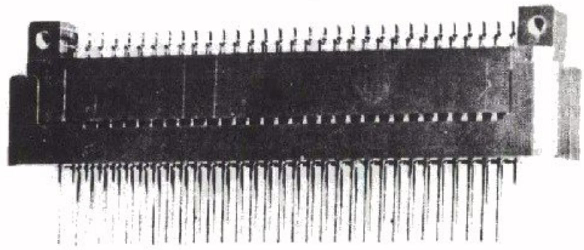


Contrasteker-deel



steker-deel met wire-wrap-pennen





het combineren van
contrasteker en steker

de gehele combinatie

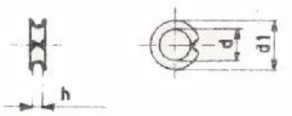
SCHROEFVERBINDINGEN

Vaak zal een leiding nog vastgezet worden met behulp van een *schroef*.
Daarbij gebruikt men:

- een *schroef*, meestal met metrische draad.
- een *sluitring*; deze dient om de druk van de schroefkop te verspreiden en om te voorkomen dat bij het vastzetten de draad "mee gaat draaien".
- een *veerring* om te voorkomen dat de schroef bij trillen los gaat zitten.
- als er geen tapgat aanwezig is, ook nog een *moer*.
- in geval van aarding gebruikt men tegenwoordig speciale *aard-ringen*; dit zijn sluitringen die aan één zijde van vijf scherpe punten zijn voorzien, die eventueel door een laklaag heendringen om goed kontakt met de metalen plaat te verzekeren.

Het is van belang dat men een geleider die uit vele koperdraadjes is samengesteld (bijvoorbeeld snoer) NOOIT soldeert op de plaats waar er een schroefverbinding mee gemaakt moet worden. Deze blijkt op den duur altijd los te gaan zitten, omdat het soldeer wegglijdt. Wel kan men gebruik maken van SCHOENOGEN. Een andere oplossing is het aanbrengen van een KABELSCHOEN, die zowel vastgesoldeerd als vastgeklemd kan worden.
Hierop komen we nog terug.

SCHOENOGEN



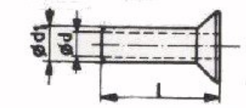
voor schroef	d	d_1	h
M3	3,4	6,5	2
M4	4,5	8	2
M5	5,5	9	2,4

Vaak moeten van buitenkomende leidingen een chassis binnengevoerd worden. Dit geschiedde meestal via *aansluitklemmen*. Tegenwoordig past men vaak *rijgklemmen* toe. Deze kunnen handig op een rail bevestigd worden. Men kan ze gemakkelijk uitwisselen en zo nodig met meerdere nieuwe aanvullen als de rail daartoe lang genoeg is. Er zijn uitvoeringen waarbij een smeltveiligheid in de rijgklem zelf is aangebracht.

SPECIALE KLEMVERBINDINGEN

Een zeer goede verbinding van draad met kabelschoen, steker of contrasteker is een zogenaamde AMP-klemverbinding. Hierbij ontstaat, zonder verhitting, door vervorming een vrijwel homogene massa van draad en kabelschoen of ander onderdeel.
De AMP-klemverbinding komt tot stand door een speciale AMP-*tang* te gebruiken. Met deze tang wordt bijvoorbeeld de kabelschoen om de draad geklemd. Men kan de tang *niet* halverwege weer openen: hij *moet* tot het eind toe doorgedrukt worden alvorens hij weer losgemaakt kan worden. Pas dus op dat er niet per ongeluk bijvoorbeeld een kledingstuk tussen komt!

DRAADBUSSEN

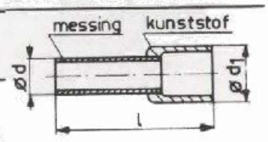


voor leiding diam mm²	d	d1	l
0,5	1,1	1,3	
0,75	1,25	1,45	6
1,0	1,4	1,6	
1,5	1,8	2,0	7
2,5	2,3	2,5	7
4	2,8	3,2	9
6	3,4	3,8	10
10	4,3	4,7	12
16	5,6	6,0	12

Om met einden van massief draad of snoer een goede verende verbinding of schroefverbinding te kunnen maken, voorziet men ze wel van een zogenaamde DRAADBUS. Deze wordt met een AMP-tang om het snoer vastgeklemd. een AMP-klemverbinding is nog beter dan een soldeerverbinding.

DRAADBUSSEN MET ISOLATIEONDERSTEUNING

voor leiding-diam mm²	kleur kunst-stof	d	d_1	l
1	rood	1	2,5	13
1,5	zwart	1,5	3	13
2,5	grijs	2	4	14,5

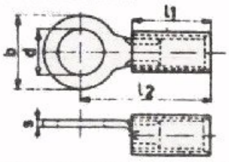


Op volgend blad vindt u een aantal voorbeelden van *kabelschoenen*. Degene die van een isolatiemantel zijn voorzien, klemt men met een bijpassende AMP-tang vast om de draad.

Op hetzelfde blad staat nog een *klemdoorverbindingsbus*. Deze dient om twee draden met behulp van een AMP-tang door te verbinden.

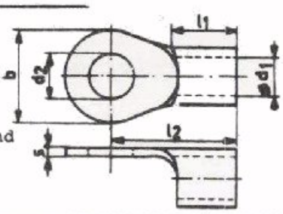
OOGKABELSCHOENEN

koper vertind,isolatiemantel PVC
75°C



nominale aanduiding (klembereik) in mm²	schroef-aansluiting	maximum toe te laten stroom in A	merkkleur	afmetingen				
				b	d	l_1	l_2	s
1,5 (0,25-1,6)	M2,6	6	rood	5,6	3,0	9,6	13,9	0,8
	M4	14		8	4,3	9,6	17,1	0,8
	M5	14		8	5,2	9,6	17,1	0,8
	M6	14		12	6,7	9,6	21,0	0,8
2,5 (1,0-2,6)	M3,5	20	blauw	6,4	3,7	9,6	14,3	0,8
	M4			8,7	4,3	9,6	17,1	0,8
	M5			8,7	5,2	9,6	17,1	0,8
	M6			12	6,7	9,6	21,0	0,8
6 (2,7-6,6)	M4	31	geel	9,5	4,3	13,9	22,0	1,0
	M5			9,5	5,2	13,9	22,0	1,0
	M6			12,7	6,7	13,9	23,4	1,0
	M8			12,7	8,3	13,9	23,4	1,0

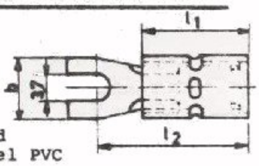
OOGKABELSCHOENEN



koper vertind

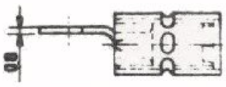
nominale aanduiding (klembereik) in mm²	schroef-aan-sluiting	b	d_1	d_2	l_1	l_2	s
10 (6,7-10,5)	M 6	12,0	4,4	6,7	8,0	17,0	1,3
16 (10,6-16,7)	M 6	15,9	5,9	6,7	9,5	23,0	1,4
25 (16,8-26,6)	M 8	16,6	7,5	8,3	11,0	24,2	1,8
35 (26,7-42,4	M 8	15,8	9,8	8,3	12,5	30,0	1,8
50 (42,5-60,5	M10	23,6	12,7	10,5	18,0	37,3	1,8

VORKKABELSCHOENEN



koper vertind
isolatiemantel PVC

max.temp. : 75°C

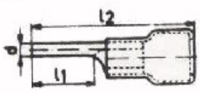


nominale aanduiding (klembereik) in mm²	merk-kleur	afmetingen		
		b	l_1	l_2
1,5 (0,25-1,6)	rood	7,5 6,4	9,9 10	15,1 17,9
2,5 (1,0-2,6)	blauw	7,5 6,2	9,8 9,9	15,0 17,8

STIFTKABELSCHOENEN

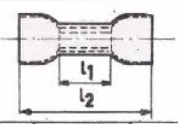
koper vertind
isolatiemantel PVC

75°C



nominale aanduiding (klembereik) in mm²	merk-kleur	afmetingen		
		d	l_1	l_2
1,5 (0,25-1,6)	rood	1,7	6,7	19,3
2,5 (1,0-2,6)	blauw	1,9	7,0	19,5
6 (2,7-6,6)	geel	2,8	10	28

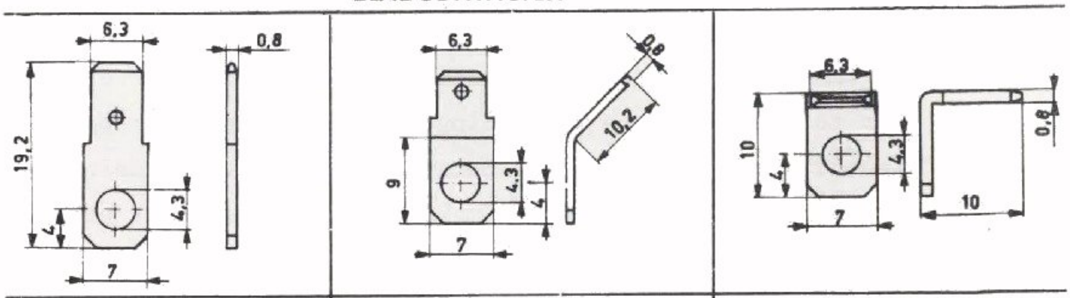
KLEMDOORVERBINDINGSBUS



nominale aanduiding (klembereik) in mm²	merk-kleur	afmetingen	
		l_1	l_2
1,5 (0,25-1,6)	rood	15	25,4
2,5 (1,0-2,6)	blauw	15	25,4
6 (2,7-6,6)	geel	16	27,4

Met behulp van een AMP-tang kunnen ook een bijzonder soort kontaktbussen, de *schuifklemkabelschoenen*, op draadeinden worden aangebracht. Men noemt ze ook wel "fastonklemmen".

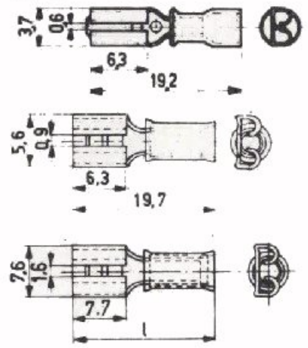
BLADCONTACTEN



bladcontact recht	bladcontact schuin	bladcontact haaks

SCHUIFKLEMKABELSCHOENEN

type: "PIDG" - FASTON



Pennen die in deze kontaktbussen passen, zijn bladkontakten, die in verschillende vormen voorkomen. Schuifklemkabelschoenen past men o.a. toe in de elektrische bedrading van auto's.

Een andere soort contrastekers en stekers die men op draadeinden kan aanbrengen door vastklemmen, zijn de zogenaamde *klemverbindingsbussen* of *ferrules*.
Ook deze treft men wel in auto's aan.

WIRE WRAP-VERBINDINGEN

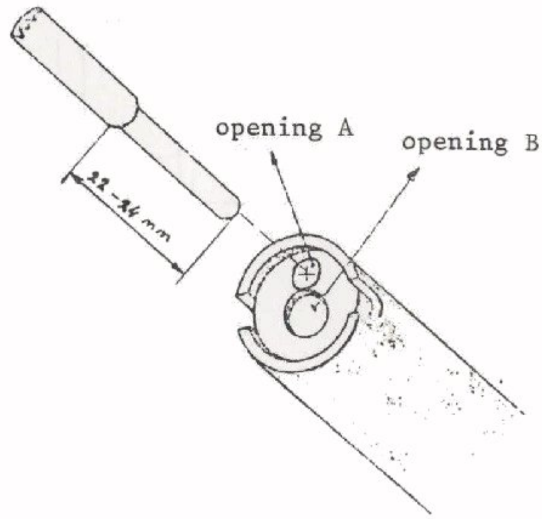
Als laatste speciale klemverbinding noemen we de wire wrap-verbinding of *draadwikkelverbinding*. Deze zult u vooral aantreffen bij de reeds besproken print-connector.
Om de draadwikkelverbinding te maken, gebruikt men *speciaal daarvoor gefabriceerd* draad dat van isolatie is voorzien. Ander draad is daarvoor *niet* te gebruiken. De verbinding is alléén aan te brengen met een daartoe dienend draadwikkelpistool. Eerst moet men het draadeinde over een voorgeschreven lengte isolatievrij maken. Vervolgens wordt het draad door middel van het wire wrappistool zeer vast om de pen gedraaid, waarmee de verbinding tot stand moet worden gebracht. Dit is b.v. een pen van een connector. De zo ontstane verbinding is zeer goed, beter dan een soldeerverbinding. Verder wordt, behalve de blanke draad, ook nog een stukje draad met isolatie om de pen geslagen. Hierdoor wordt de blanke draad ontlast en zal deze niet gauw afbreken, hetgeen bij soldeerverbindingen nogal eens voor kan komen.
Op blad B127.21 kunt u zien hoe een draadwikkelverbinding tot stand komt.
Het draadwikkelpistool wordt door perslucht in werking gesteld.
Op blad B127.22 ziet u dit.
Een te leggen verbinding kan men aan beide einden "wire wrappen". De draad zal dan niet tamelijk strak tussen de aansluitpunten kunnen liggen, omdat de lengte langer moet zijn dan de direkte afstand. Dit neemt men op de koop toe.

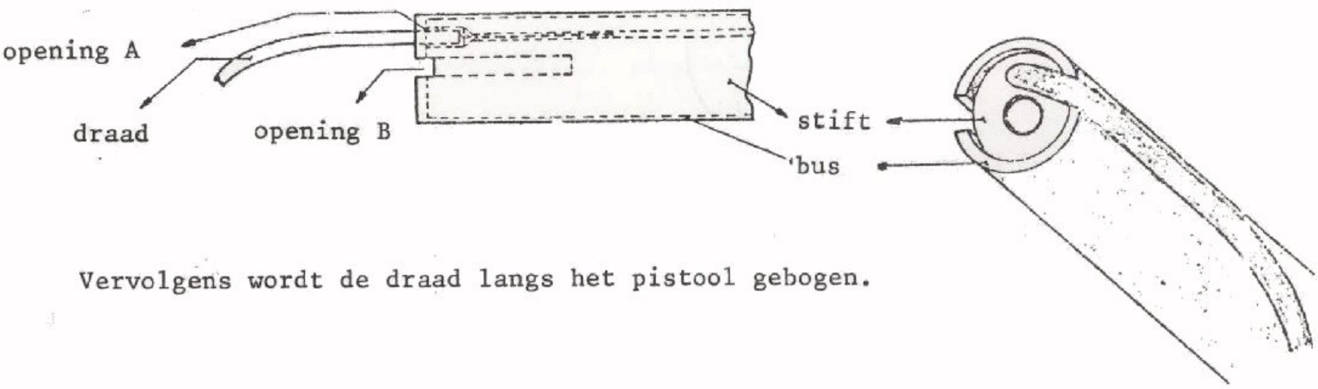
STRIPPEN

Teneinde geisoleerde draden te ontdoen van de isolatie om ze goed te kunnen solderen of klemmen, wordt gebruik gemaakt van speciale striptangen. Hierin wordt de draad vastgeklemd terwijl tegelijkertijd een deel van de isolatie van de draad wordt afgeschoven.

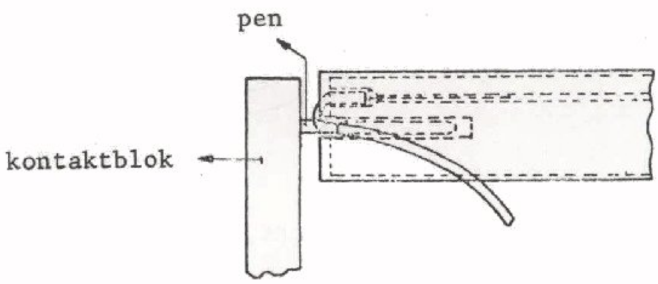
HET "WIRE-WRAPPEN"

Eerst wordt het draadeinde in opening A van het pistool gebracht.



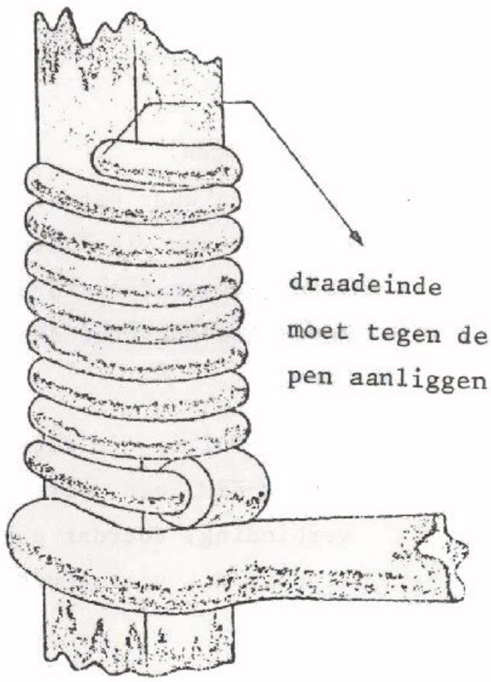


Vervolgens wordt de draad langs het pistool gebogen.

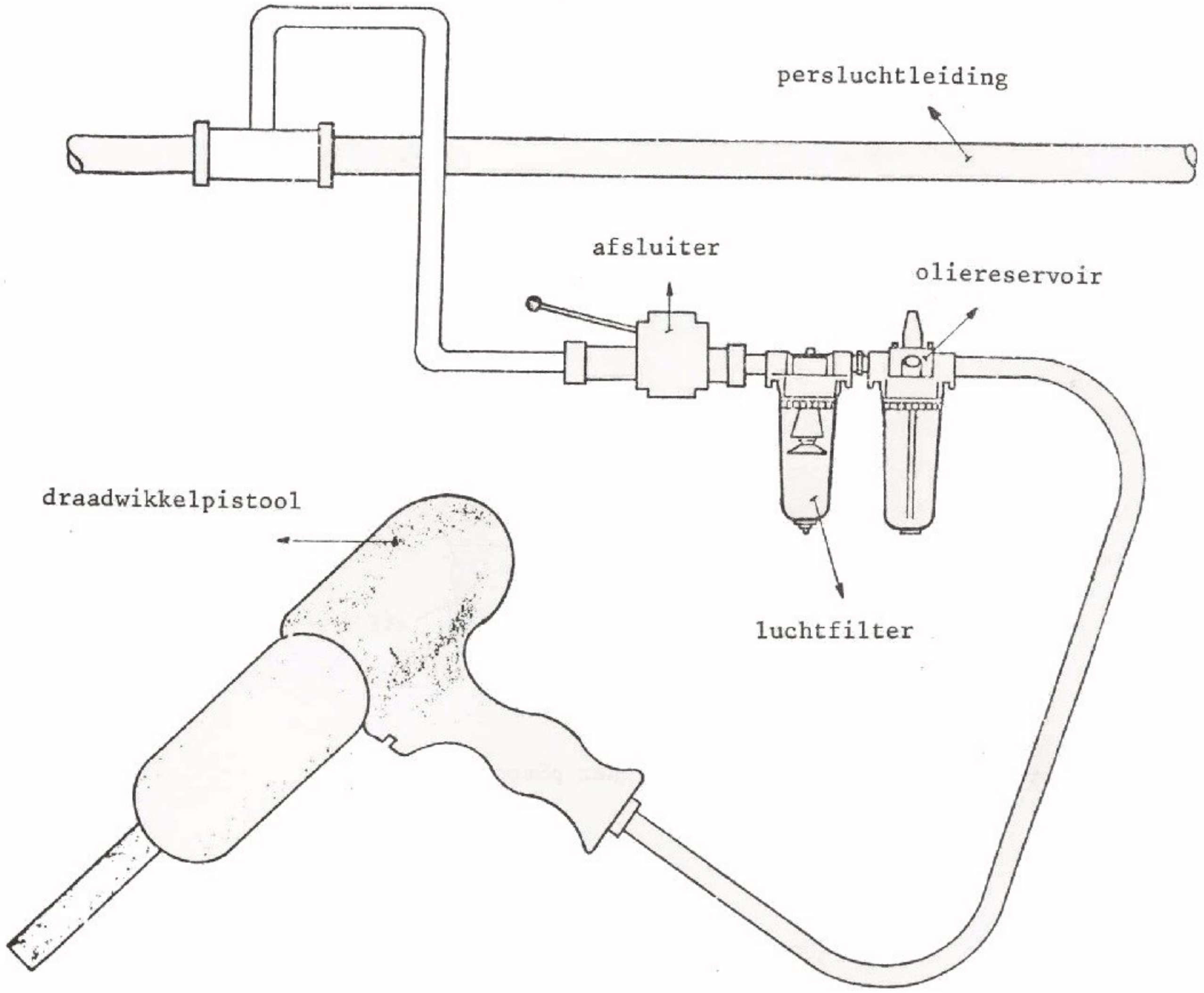


Daarna wordt de pen in opening B gestoken en het pistool goed tegen het kontaktblok gedrukt.

Na het gebruik van het pistool zit de draad strak om de pen gewikkeld.



Het aansluiten van het draadwikkelpistool



Men heeft ook wire wrap-pistolen die niet met perslucht, maar elektrisch met behulp van een kleine ingebouwde accu worden bedreven.

Opmerkingen:

- De pennen waar het draad omgewikkeld wordt, zijn altijd "hoekige" pennen, b.v. met een vierkante doorsnede. Het draad wordt daardoor met grote kracht tegen de scherpe kanten van de pen geslagen, zodat een soort koude las ontstaat die een zeer goed kontakt en stevige verbinding waarborgt.
- Binnen Philips is door de gezamenlijke elektro-bedrijfsmechanisaties (Inter-EBM) een voorschrift gemaakt voor het toepassen van de wire-wrap-verbinding. Voordat u dit soort verbindingen zelf gaat maken, is het verstandig dit voorschrift te raadplegen.

DE WIJZE VAN BEDRADING

Na de bespreking van de diverse geleiders en de manieren om ze te bevestigen, komen we tot slot op de wijze van leggen van de bedrading en het opstellen van de onderdelen.
Hierover een uitputtende bespreking te geven is niet de bedoeling. Het is trouwens ook niet goed te doen vanwege de vele variaties die zich in de praktijk kunnen voordoen. We volstaan daarom met het geven van een aantal nuttige wenken. Deze kunt u in gedachten nog aanvullen met een, misschien nog wel groter, aantal ervaringen en regels uit uw eigen praktijk.

Alvorens te gaan bedraden moet men eerst de verschillende componenten opstellen en vastzetten. Het is van groot belang om dit met overleg zo gunstig mogelijk te doen. Als men, bijvoorbeeld vanwege haast, de verschillende onderdelen ongunstig opstelt, heeft men daar later veel onnodige extra moeite mee. Vaak zal men zelfs gedwongen zijn om helemaal opnieuw te beginnen! De tijd die aan het begin in een goed overleg wordt gestoken, wordt naderhand dubbel en dwars terug verdiend als de onderdelen gunstig zijn opgesteld.

OPSTELLEN VAN ONDERDELEN

Enkele regels die meestal opgaan:

- Het verdient aanbeveling om het "*sterkstroomdeel*" (voedingsspanning met bijbehorende zekering en schakelaar, voedingstrafo) gescheiden te houden van het "elektronicadeel". Voor het sterkstroomdeel gelden vaak aparte strenge veiligheidsvoorschriften.

- Met onderdelen die tijdens het bedrijf *heet* worden, moet rekening worden gehouden door:
  - deze onderdelen bovenin (en niet onderin) de montageruimte te plaatsen; de verhitte omgevingslucht gaat namelijk omhoog en verhit dan geen andere onderdelen.
  - deze onderdelen zó op te stellen dat ze hun eigen warmte goed kwijt kunnen.
  - ervoor te zorgen dat er geen andere onderdelen die van hun hitte last zullen ondervinden in de buurt gemonteerd worden.

- Schakelingen die gevoelig zijn voor *LF-magneetvelden* dient men ver te houden van voedingstransformators en afvlaksmoorspoelen voor de voeding. De kernen van LF-transformators bij voorkeur in een stand "loodrecht op elkaar" opstellen, waardoor ze elkaar minder kunnen beïnvloeden.

Gemakkelijk bereikbaar op te stellen dient men:

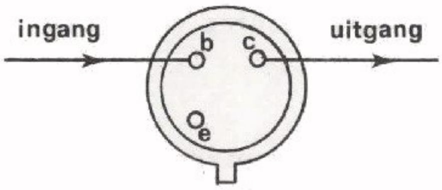
- uitwisselbare onderdelen, zoals buizen, zekeringen, signaallampjes, enz.
- service vereisende plaatsen, zoals sommige schakelaars, relais-kontakten, enz.
- instelbare onderdelen, zoals trimmers, instelbare weerstanden, afregelbare spoeltjes, enz.

Onderdelen met *leesbare opschriften* dient men zó te monteren, dat deze opschriften na beëindiging van de montage nog gemakkelijk te lezen zijn. Het invoeren van zekere regelmaat is hierbij aan te bevelen. Vanuit één gezichtshoek moet men liefst alle opschriften gewoon kunnen lezen en niet bijvoorbeeld de helft "op zijn kop". Verder alle weerstanden en condensators met kleurcodering zo, dat ze alle van links naar rechts gelezen worden en niet een deel net andersom.

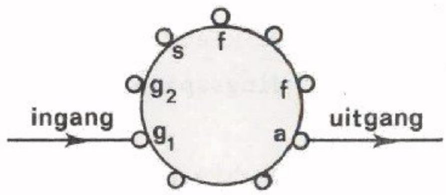
BEDRADEN

Hiervoor zijn volgende richtlijnen nuttig:

- Veel schakelingen, zoals versterkers, hebben een *ingang* en een *uitgang*. Bij de bedrading en ook bij de opstelling van onderdelen dient men nooit met de uitgang in de buurt van de ingang te komen! Dit kan al gauw een spontaan opwekken van een wisselspanning door de schakeling zelf tot gevolg hebben: men zegt dan dat hij "genereert" of "oscilleert". In het C-deel zullen we daar uitvoerig op terugkomen.
  Leg daarom nooit ingangs- en uitgangsbedrading vlak bij elkaar. Ook een enkele versterktrap heeft een in- en een uitgang. Zorg ervoor dat, als het ingangssignaal van links komt en het uitgangssignaal naar rechts gaat, de actieve component (transistor of buis) dan met zijn ingang naar links en met zijn uitgang naar rechts wijst.



BC107 in GES



EF86 in KBS

- Zorg ervoor *overzichtelijk* te bedraden. Dan is bij controle alles gemakkelijker na te lopen. Gebruik eventueel draden met verschillende kleuren of met cijfers aan begin en eind.

- In geval van buisschakelingen verdient het aanbeveling de gloeistroomdraden in elkaar te draaien (te "twisten"). Dit voorkomt een storend magnetisch wisselveld, dat brom kan veroorzaken.

- Leidingen die zeer kleine signalen moeten transporteren dienen vaak afgeschermd te worden, zoals bijvoorbeeld pick-up-leiding in een ontvanger.

- Gebruik bij *aarding* aan plaatwerk steeds een echte aarding, zoals bij schroefverbindingen is besproken. Zorg ervoor dat aarding nooit via een scharnier geschiedt. Het komt nogal eens voor dat diverse punten van een schakeling elk met een aparte aardleiding geaard moeten worden. Aarding via een gemeenschappelijke leiding zal tot ongewenste koppelingen van verschillende delen geleiden. De gemeenschappelijke leiding heeft zelfinductie en vormt daardoor bij hoge frequenties een niet te verwaarlozen gemeenschappelijke reactantie.

- Bij bedrading van *HF-schakelingen* is van belang:
  - Zo kort mogelijke verbindingen.
    Elke draad heeft namelijk enige zelfinductie zoals bij de bespreking van coaxiale kabels reeds behandeld is.
  - Verbindingen niet te dicht langs andere geleiders laten lopen, omdat dit onnodige extra capaciteit veroorzaakt.
  - Als draden toch in de buurt van elkaar moeten lopen, dan ze zo mogelijk loodrecht op elkaar houden.

- Ten aanzien van installaties van machines en meetapparaten zijn bepaalde afspraken gemaakt over het te gebruiken montagedraad.
  De kleur geel/groen is bestemd voor de veiligheidsaarde. De "randaarde" van de aansluitsteker wordt hiermee doorverbonden.
  De kleuren zwart of bruin zijn bestemd voor de fasen van de aan te sluiten voedingsspanning.
  De kleur blauw is bestemd voor de nulleiding van de aan te sluiten voedingsspanning.

  De hierboven gegeven afspraken gelden internationaal.
  Bovengenoemde kleuren montagedraad mogen niet op andere plaatsen in apparaten worden toegepast, omdat anders gevaarlijke vergissingen gemaakt kunnen worden.

B 128

HERHALING SPOEL, TRAFO EN VERBINDINGEN

INLEIDING

In de voorafgaande lessen hebben we herhaald wat we in het A-deel van de cursus geleerd hebben over spoelen en transformators. Verder hebben we daar een groot aantal nieuwe dingen aan toegevoegd. We hebben het gehad over soorten en typen, eigenschappen en toepassingen. Tot slot zijn de verschillende verbindingen besproken, waarbij de coaxiale kabel extra aandacht kreeg.

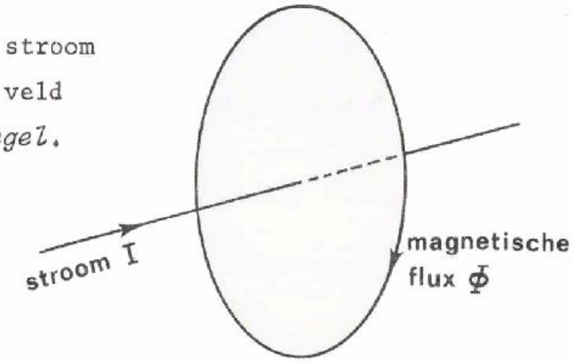
In deze les wordt dit alles nog eens in het kort herhaald. Ze bevat een aantal vragen zoals u die op de test B129 kunt verwachten.

Enkele tips.

- Ga na of u alles wat hier herhaald wordt inderdaad begrijpt. Hebt u daarover ook maar enige twijfel, vraag dan uw leraar om nadere uitleg.
- Probeer de oefeningen zelfstandig te maken. Lukt dit niet, ga dan na waar dat aan ligt.
- Bestudeer de *geheugensteun*. Zorg er goed in thuis te raken, want bij de volgende test mag u ze gebruiken.

MAGNETISME

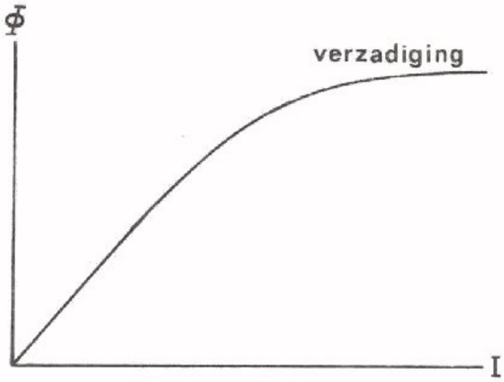
- De richting van de elektrische stroom en het bijbehorend magnetische veld volgen uit de *rechtse schroefregel*.



- Voor *magneetpolen* geldt de regel, dat ongelijknamige polen elkaar aantrekken en gelijknamige elkaar afstoten.
  Voor *magnetische velden* geldt, dat zij altijd zullen proberen samen te vallen.

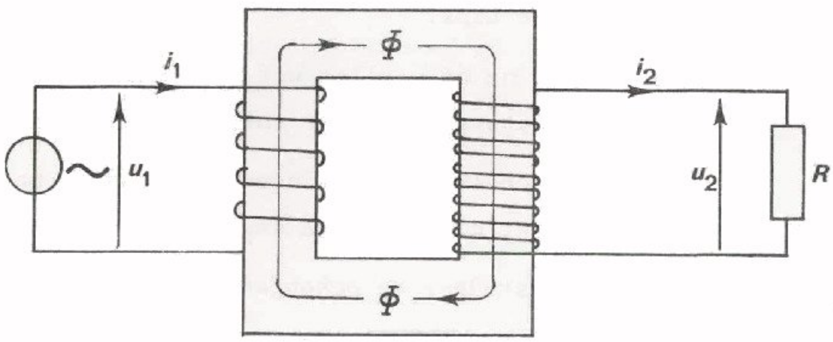
- Het magnetisch veld van een spoel kan men aanzienlijk versterken door er een *ijzeren kern* in aan te brengen.

- Laat men de stroom I door een spoel met ijzerkern toenemen, dan neemt de flux Φ aanvankelijk ongeveer evenredig toe met de stroom. Bij grotere stromen loopt het ijzer in *verzadiging*. Φ neemt dan nauwelijks meer toe.



- Koppelt men een spoel met een wisselend magnetisch veld, dan wordt er in elke winding een *inductiespanning* U_{ind} opgewekt. Voor de gehele spoel met n windingen staan de opgewekte inductiespanningen in serie, zodat de totale spanning nu n x zo groot wordt.
  Hoe meer windingen, en ook hoe snellere veldwisseling, des te groter is U_{ind}.

- Toepassing van de inducerende werking van een wisselende magnetische flux is de *transformator*.



DE SPOEL EN ZIJN ZELFINDUCTIE

De zelfinductie van een spoel:

$$L = \frac{U.t}{I}$$

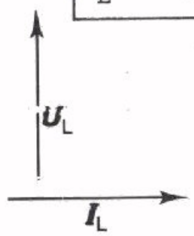
De zelfinductie is de verhouding tussen de "toegevoerde spanning maal tijd" en de daardoor ontstane stroom. Hoe langer men een spanning U aan een spoel toevoert, tot des te grotere waarde de stroom I aangroeit.

- De zelfinductie is des te groter naarmate het eigen magnetische wisselveld groter is. Het eigen veld is te vergroten door:
  - meer windingen aan te brengen.
  - de spoel dikker te maken met behoud van zelfde aantal windingen.
  - de spoel korter te maken met behoud van zelfde aantal windingen.
  - een kern van te magnetiseren materiaal in de spoel aan te brengen.

- De reactantie $X_L = \frac{u}{i}$ van een verliesvrije spoel bedraagt:

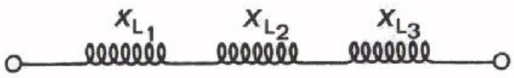
$$X_L = 2\pi fL = \omega L$$

X_L : reactantie Ω.
f : frequentie Hz.
L : zelfinductie H.



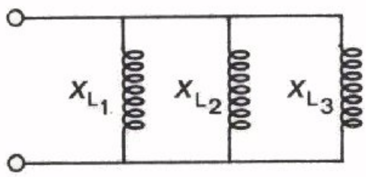
Bij een verliesvrije spoel ijlt de spanning u_L 90^0 voor op de stroom i_L.

- Bij spoelen in serie geldt voor de vervangings*reactantie* hetzelfde als bij weerstanden voor de vervangingsweerstand:



$$X_{L_S} = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} + \ldots$$

- Bij spoelen parallel geldt voor de vervangings*reactantie* hetzelfde als bij weerstanden voor de vervangingsweerstand:

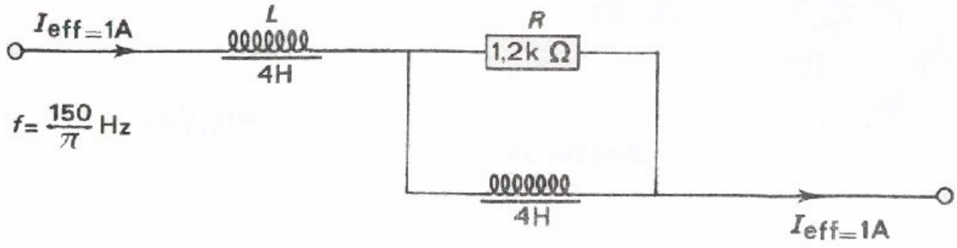


$$\frac{1}{X_{L_p}} = \frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}} + \frac{1}{X_{L3}} + \ldots$$

- Een verliesvrije spoel neemt gemiddeld geen wisselstroomvermogen op. In $P = I_{eff} \cdot U_{eff}$; $\cos\varphi$ is dan: $\cos\varphi = \cos 90^0 = 0$.

TEST UZELF

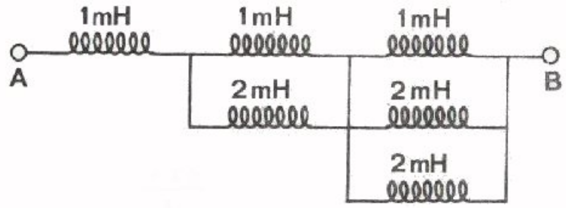
1.



Bereken het vermogen dat door deze schakeling wordt opgenomen.

P =

2. Bereken de zelfinductie tussen A en B.

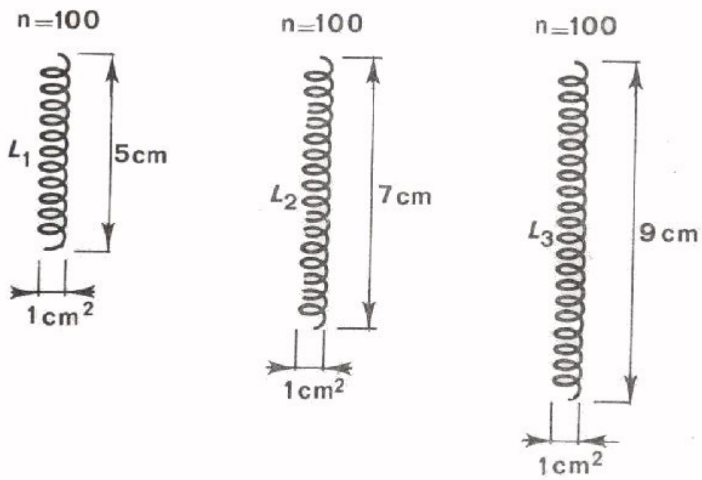


L =

3. Als men gedurende 60 μs een spanning van 150 mV aansluit op een spoel, neemt de stroom vrijwel lineair toe tot 120 μA. Hoe groot is de zelfinductie van de spoel?

L =

4.



Welke van deze drie luchtspoelen heeft de grootste zelfinductie?

UITWERKINGEN

1. Alleen door R = 1k2 wordt vermogen opgenomen.

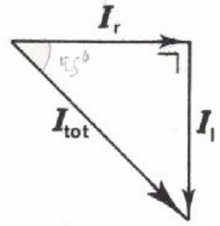
Door R loopt echter maar een deel van de gehele stroom = 1 A.

Parallel aan R staat L = 4 H, zodat $X_L = \omega L = 2\pi f L = 2\pi \cdot \frac{150}{\pi} \cdot 4 = 1200\ \Omega$. Door R en door L gaat een even grote stroom. Deze is *niet* gelijk aan ½ A, want de stromen i_R en i_L zijn 90° in fase verschoven.

Vectordiagram:

I_{tot} = 1 A

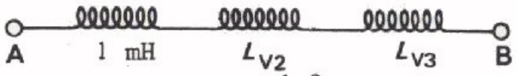
$I_r = I_l = \frac{1}{\sqrt{2}}$ A



Het in R ontwikkelde vermogen $P = I^2_{eff} \cdot R$

$= (\frac{1}{\sqrt{2}})^2 \cdot 1200 =$ <u>600 W</u>

2.



$L_{V2} = \frac{1 \cdot 2}{1+2} = \frac{2}{3}$ mH

$\frac{1}{L_{V3}} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 2$

L_{V3} = ½ mH

Totaal: 1 + 2/3 + 1/2 = <u>2 1/6 mH</u>

3. $L = \frac{U \cdot t}{I} = \frac{150 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 10^{-6}}{0{,}12 \cdot 10^{-3}} = 75 \cdot 10^{-3}$ H

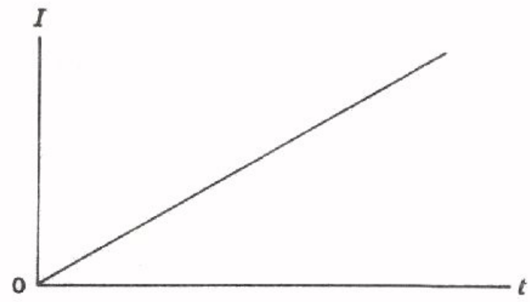
$=$ <u>75 mH</u>

4. Het aantal windingen en de dikte van de spoelen is hetzelfde. De kortste spoel heeft dus de grootste zelfinductie en dat is <u>de eerste</u> (L_1).

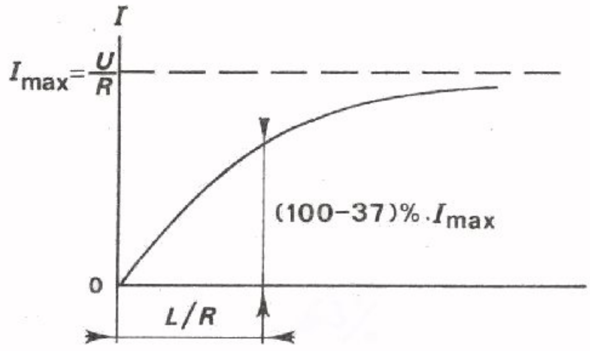
Vergelijk uw kladblaadjes eens met bovenstaande!

HET TOE- EN AFNEMEN VAN DE STROOM DOOR EEN SPOEL.

- Sluit een gelijkspanning aan op een *ideale* spoel, dan neemt de stroom lineair toe.

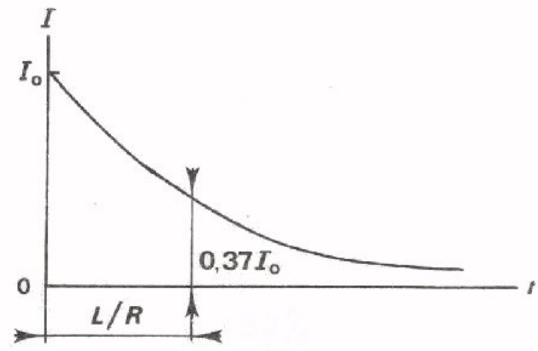


- Sluit men een gelijkspanning aan op een serieschakeling van een weerstand en een spoel, dan groeit de stroom door de spoel minder dan lineair aan.



- Sluit men een stroomvoerende R-L-schakeling plotseling kort, dan neemt de stroom in de spoel minder dan lineair af.

  In de $\frac{L}{R}$ - tijd neemt de stroom af tot 37% van zijn beginwaarde I_0.

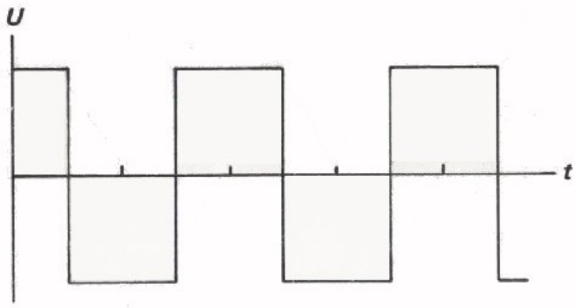


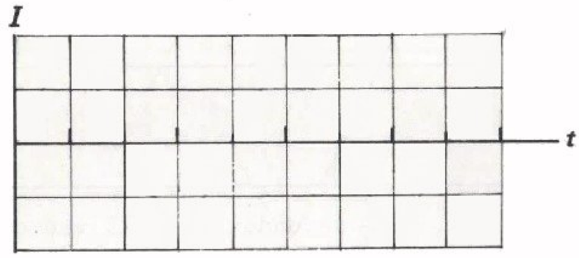
Het toe- of afnemen van de stroom geschiedt langzamer:
- naarmate de L groter is.
- naarmate de R kleiner is.

- Men mag een stroomvoerende spoel nooit plotseling "open" schakelen, omdat:
  - de dan optredende grote zelfinductiespanning doorslag van de winding-isolatie kan veroorzaken,
  - het optreden van vonken tussen de kontakten van de schakelaar deze kontakten op den duur doet inbranden.

TEST-UZELF

5. Aan een ideale spoel voert men onderstaande spanning U toe. Schets het verloop van de stroom I door de spoel.





6. In een spoel van 1 H met een weerstand R = 1 kΩ loopt een stroom van 0,1 A. Als men deze spoel plotseling kortsluit, na hoeveel tijd is de stroom dan afgenomen tot 37 mA?

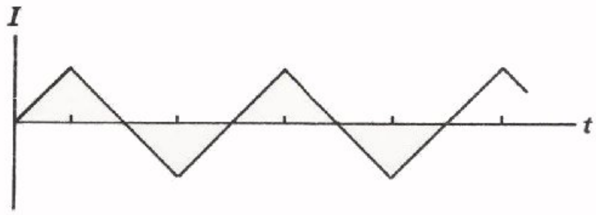
t =

Tot hoever is de stroom afgenomen na 2 ms?

I_3 =

UITWERKING

5. Sluit men een gelijkspanning op een spoel aan, dan neemt de stroom lineair (volgens een rechte lijn) toe.
Sluit men de gelijkspanning met omgekeerde polariteit aan, dan neemt de stroom in omgekeerde richting lineair toe. Of in vergelijking met de oorspronkelijke stroomrichting lineair af.
Het verloop is dus als volgt.



6. De stroom neemt in $\frac{L}{R}$ seconden tot 37% van de oorspronkelijke waarde af.

$$\frac{L}{R} = \frac{1}{1000} = 10^{-3}\ \text{s}$$

In <u>1 ms</u> dus

In 2 ms is de stroom afgenomen tot:

37% van 37 mA, dat is dus:

0,37 x 37 = <u>13,7 mA</u>.

SPOELWIKKELINGEN

- Methoden van wikkelen zijn:
  - (éénlaags) cylindrisch wikkelen; spoed(s) ≥ diameter (d) van de draad.
  - semi-bank wikkelen; s < d en hoogstens 3 lagen gemiddeld.
  - hoogkant geslingerd wikkelen; lagen liggen schuin over elkaar.
  - wilde wikkeling; flenzen nodig.
  - orthocyclisch wikkelen; volkomen regelmatig tussen mallen wikkelen; verhittingsnabewerking.

- Behalve massief koperdraad past men ook *litze-draad* toe. Dit geeft bij hoge frequenties minder last van het *skin-effekt* of huideffekt. Genoemd effekt betekent dat de wisselstroom bij hoge frequenties nog alleen maar aan de buitenkant van de geleider (de "huid") gaat lopen, zodat de voor stroomgeleiding benutte koperdoorsnede sterk afneemt. Daarom is dan $R_{wissel} >> R_{gelijk}$.

- De *vulfaktor* v van een spoel is:

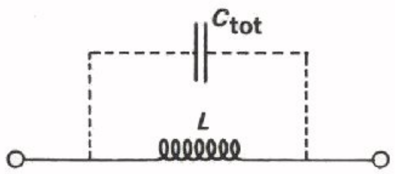
$$v = \frac{n \cdot A}{b \cdot h}$$

n = aantal windingen.
A = opp. van de doorsnede van de draad.
b = wikkelbreedte.
h = wikkelhoogte.

- Aan een spoel mag men niet meer dan een bepaald maximaal vermogen toevoeren. Dit beperkt de maximaal toelaatbare *stroom*.

- Aan een hoogspanningsspoel mag men niet meer dan een bepaalde maximale *spanning* toevoeren. Dit ter voorkoming van doorslag van de isolatie tussen windingen.

- Een spoel heeft tussen zijn windingen capaciteit. Daarom is een spoel als het ware een *parallel-kring*.



C_{tot} vertegenwoordigt de gezamelijke C'tjes tussen de windingen.

Bij hoge frequenties (boven $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{tot}}}$) gaat de spoel zich als een capaciteit gedragen.

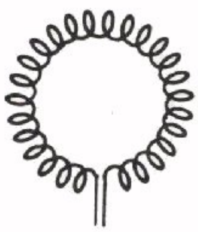
KERNMATERIAAL

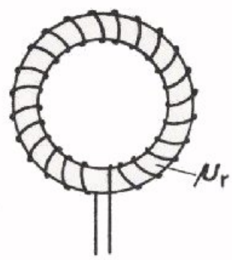
- Toegepaste kernmaterialen zijn:

gelamelleerd silicium - ijzer	tot ≈ 15 kHz
Ferroxcube	tot ≈ 25 MHz
poederijzer	boven 25 MHz

- Goed kernmateriaal heeft:
  - weinig hysteresisverliezen bij de frequentie waarbij men het gebruikt.
  - weinig wervelstroomverliezen bij de toegepaste frequentie: dit wordt bereikt door te zorgen voor een grote elektrische weerstand die het materiaal biedt aan wervelstromen.

- De relatieve permeabiliteit μ_r van een kernmateriaal geeft aan hoeveel maal zo groot de zelfinductie van een gesloten luchtspoel wordt als hij geheel met dit materiaal wordt gevuld.





- De zg. *potkernen* hebben nog het voordeel dat buiten de potkern vrijwel geen magnetisch veld van de spoel aanwezig is.

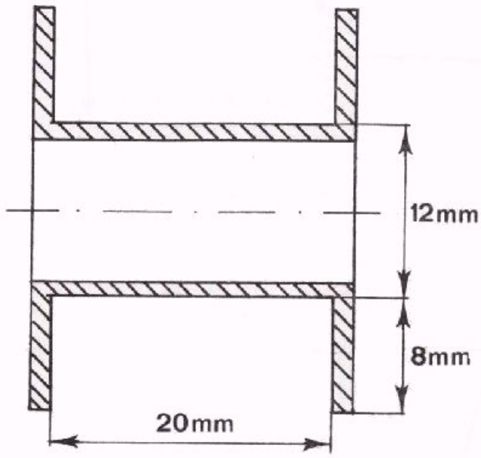
- Naar buiten treden van het magnetische veld van kleine spoeltjes wordt voorkomen door ze in een metalen huisje op te bergen. Hierdoor neemt de L enigszins af.

TOEPASSINGEN VAN SPOELEN.

- Een *LF*-smoorspoel is een spoel met grote zelfinductie (b.v. 10 H). Hij heeft voor gelijkstroom een vrij kleine weerstand, voor *LF*-wisselstroom echter een grote reactantie (*LF* is bijvoorbeeld 50 Hz).
- Een *HF*-smoorspoel is een spoel met kleine zelfinductie (b.v. 10 mH). Hij vormt voor *LF*-wisselstroom vrijwel een kortsluiting, maar heeft voor *HF*-wisselstroom een grote reactantie (*HF* is bijvoorbeeld 1 MHz).
- Tezamen met een condensator vormt een spoel een resonantiekring. Als seriekring heeft deze bij resonantie een zeer kleine impedantie en daarbuiten een veel grotere.
  Als parallelkring heeft hij bij resonantie een grote impedantie en daarbuiten een veel kleinere.
- Door de spoelstroom telkens plotseling te onderbreken kan men hoge piekspanningen opwekken.

TEST UZELF

7. Men wikkelt deze spoelkoker cylindrisch (met $s = d$) vol met ronde draad.
De draaddiameter is 0,8 mm en de buitendiameter is 1 mm.
Hoeveel windingen gaan er op de koker?



n = [ ]



Hoe lang is de gemiddelde lengte van een winding l_1?

l_1 = [ ]

Hoe lang is de benodigde draad?
Neem aan dat er buiten de windingen nog aansluiteindjes van 1 cm nodig zijn.

totale lengte l = [ ]

Hoe groot is de vulfaktor? v = [ ]

8. In een spoel met kern die op een wisselspanning wordt aangesloten treden drie soorten verliezen op.
Dit zijn:

[-], [ ] en [-]

verliezen.

UITWERKINGEN

7. Er gaan 20 windingen naast elkaar en 8 boven elkaar. Totaal dus:

$$n = 20 \times 8 = 160$$

De diameter van de gemiddelde winding:

$$D = 12 + 4 + 4 = 20 \text{ mm}$$

l_1 = omtrek van die winding = $\pi D = \pi\, 20$

$\approx 62{,}8$ mm

Benodigde draad: $160 \times l_1 = 1005$ cm

$l = 1005 + 2 = 1007$ cm

De vulfactor $v = \dfrac{n \cdot A}{b \cdot h}$

$n = 160$

$A = \frac{1}{4}\pi\ (0{,}8)^2\ \text{mm}^2$

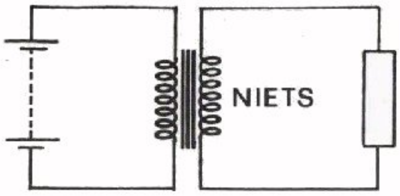
$b = 20$ mm

$h = 8$ mm

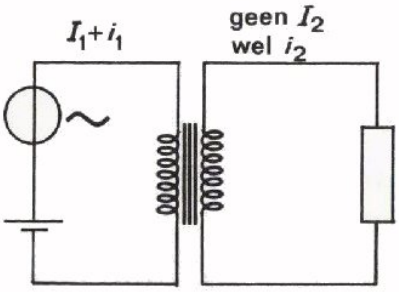
$$v = \frac{160 \cdot \frac{1}{4}\pi \cdot 0{,}64}{20.8} \approx 0{,}5$$

8. koper-
hysteresis-
wervelstroom-

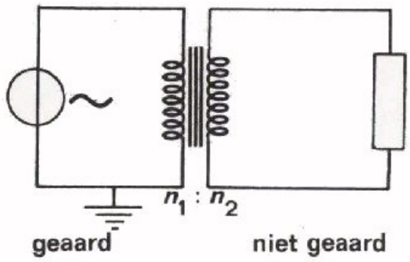
DE TRANSFORMATOR



- Een transformator werkt *niet* op gelijkspanning. Voor de werking van een transformator is een veranderende magnetische flux noodzakelijk.



- De primaire en de secundaire stroomkringen zijn geheel van elkaar gescheiden.
  Zo zal bijvoorbeeld aanwezige gelijkstroom in de secundaire kring niets veroorzaken.



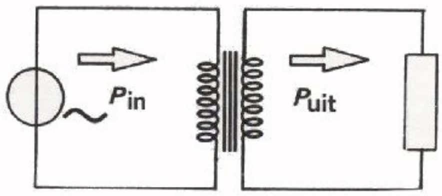
- Verder zal aarding van de ene stroomkring niet automatisch ook aarding van de andere tot gevolg hebben.

- Door middel van een transformator kan men wisselspanning, wisselstroom en een impedantie "omtransformeren".

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{n_2}{n_1} \qquad \frac{i_2}{i_1} = \frac{n_1}{n_2} \qquad R_{in} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot R$$

- Bij een *ideale*- of verliesvrije transformator is:

  $P_{uit} = P_{ing}$



- Bij een praktische transformator treden wél verliezen op, waardoor $P_{uit} < P_{in}$.

  Koperverliezen zijn te wijten aan de weerstand van de koperen wikkelingen.

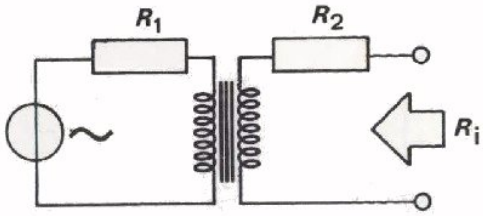
  IJzerverliezen zijn te wijten aan:
  - de moeite die het kost om het ijzer telkens om te magnetiseren (hysteresisverliezen).
  - het optreden van inductiestromen in het ijzer van de kern (wervelstroomverliezen)

- Door de verliezen is het ***rendement*** η kleiner dan 100%:

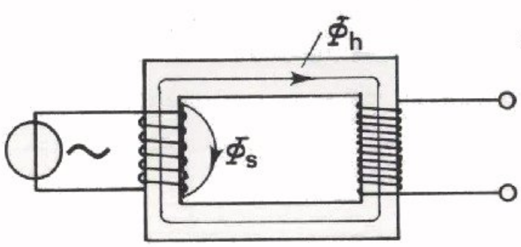
$$\eta = \frac{P_{uit}}{P_{in}} \, 100\% < 100\%$$

- De inwendige weerstand R_i van de transformator, gezien vanuit de belasting, bedraagt:

$$R_i = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 R_1 + R_2$$



hierin is: R_1 = koperweerstand van primaire
R_2 = koperweerstand van secundaire.

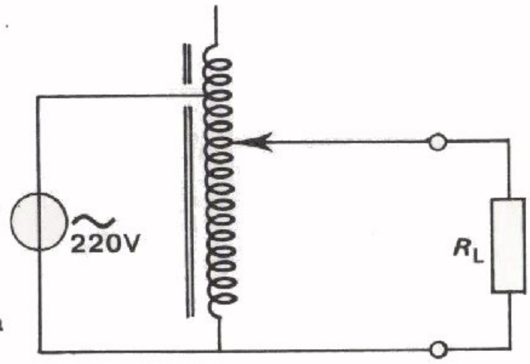


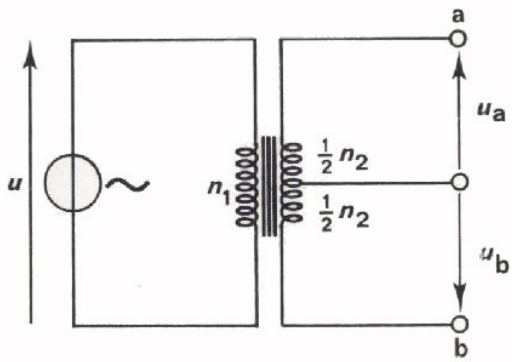
$$k = \frac{\Phi_h}{\Phi_h + \Phi_s} = \frac{\Phi_h}{\Phi_{tot}}$$

- De *koppelfactor* bij een symmetrische transformator geeft de verhouding van de met de secundaire gekoppelde flux Φ_h tot de som van de wel gekoppelde hoofdflux Φ_h en de spreidingsflux Φ_s.
  - Bij een normale *LF*-transformator is $k \approx 1$.
  - Bij een *HF*-transformator kan k veel kleiner zijn dan 1.

- Een bijzonder veel toegepaste nettransformator is de *variac*. Dit is vaak een regelbare autotransformator. De secundaire spanning wordt afgenomen van een koolborstel, die beweegbaar is langs de wikkeling van de transformator.

  Men heeft ook variac's met gescheiden wikkelingen.



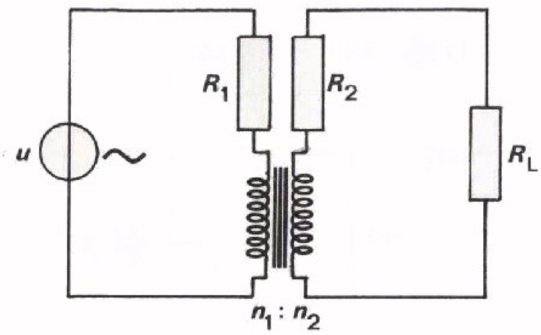


Een veel toegepaste *LF*-transformator is er een met een secundaire middenaftakking. Op die manier komen twee even grote wisselspanningen ter beschikking, die precies in tegenfase zijn.

$$u_a = u_b = \frac{\frac{1}{2}n_2}{n_1}\, u.$$

TEST UZELF

9.



R_1 = 10 Ω

R_2 = 110 Ω

R_L = 790 Ω

$n_1 : n_2$ = 1 : 3

u = 220 V.

Hoe groot is de inwendige weerstand R_i, gezien vanuit de belasting?

R_i =

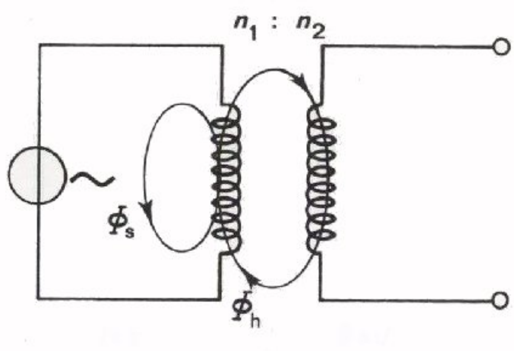
Hoe groot is de belasting die de spanningsbron u ziet?

R =

Hoe groot is het rendement als de ijzerverliezen te verwaarlozen klein zijn?

η =

10.



Voor een luchttransformator geldt:

$n_1 : n_2 = 1 : 8$

$\Phi_h : \Phi_s = 3 : 1$

De koppelfaktor:

k =

Als u_1 = 10 V, dan:

u_2 =

UITWERKINGEN

9. $R_i = (\frac{n_2}{n_1})^2 R_1 + R_2$

$= (\frac{3}{1})^2 . 10 + 110 = 90 + 110 = 200\ \Omega$

De spanningsbron ziet: $R_1 + (\frac{n_1}{n_2})^2 (R_2 + R_L)$

$= 10 + (\frac{1}{3})^2 (110 + 790)$

$= 10 + \frac{1}{9} . 900 = 110\ \Omega$

Rendement:

$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{110} = 2$ A

$I = \frac{n_1}{n_2} . I_1 = \frac{1}{3} . 2 = \frac{2}{3}$ A.

$P_v = P_{R_1} + P_{R_2} = I_1^2 . R_1 + I_2^2 . R_2$

$= 4.10 + \frac{4}{9} . 110 \approx 89$ W.

$P_{RL} = I_2^2 . R_L = \frac{4}{9} . 790 = 352$ W.

$$\eta = \frac{P_{R_L}}{P_{R_L} + P_v} 100\% = \frac{352}{352 + 89} 100\% \approx 80\%.$$

10. $k = \frac{\Phi_h}{\Phi_h + \Phi_s} = \frac{3}{4}$

$U_2 = k . (\frac{n_2}{n_1}) U_1 = \frac{3}{4} . (\frac{8}{1}) 10 = 60$ V.

AANPASSING

- In geval van aanpassing is er sprake van:
  - een bron
  - een signaal
  - een belasting



- *Aanpassen* is: zorgen dat een elektrisch signaal optimaal van bron naar belasting wordt doorgegeven. Vaak wordt hiervoor een transformator gebruikt.

  "Optimaal" wil hier zeggen dat er zo goed mogelijk aan van tevoren gestelde eisen wordt voldaan. Dit kan o.a. zijn:

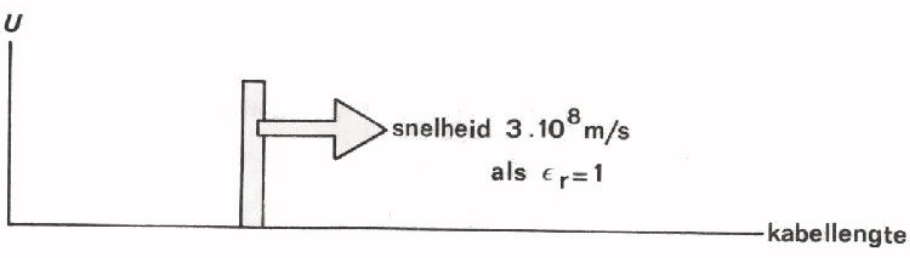
  - zoveel mogelijk vermogen aan de belasting toevoeren.
  - vermogen leveren met zo min mogelijk verlies.
  - het signaal onvervormd doorgeven.
  - de bron belasten zonder dat hij er onder te lijden heeft.
  - de belasting van signaal voorzien zonder dat deze er onder te lijden heeft.

KABEL

- Een kabel heeft:

  Capaciteit tussen zijn geleiders.
  Zelfinductie,
  grote *parallelweerstand* en kleine *serieweerstand*.

- De aanwezige capaciteit en zelfinductie hebben tot gevolg dat een spannings puls *tijd* nodig heeft om van begin naar eind van een kabel te komen.
  Met behulp van de voortplantingssneldheid en bij een open kabel optredende reflecties, is het mogelijk nauwkeurig de plaats van een kabelbreuk te bepalen.



- Stuurt men een spanningsimpuls een kabel in, dan kan deze impuls aan het uiteinde geheel of gedeeltelijk *gereflecteerd* (= "teruggekaatst") worden:



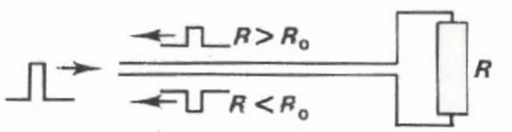
- bij open uiteinde wordt hij met dezelfde polariteit geheel gereflecteerd.



- bij afsluiting met R_o wordt hij *niet* gereflecteerd.

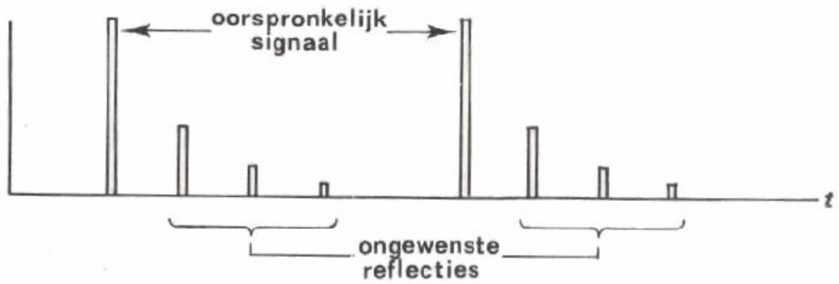


- bij kortgesloten uiteinde wordt hij met tegengestelde polariteit geheel gereflecteerd.



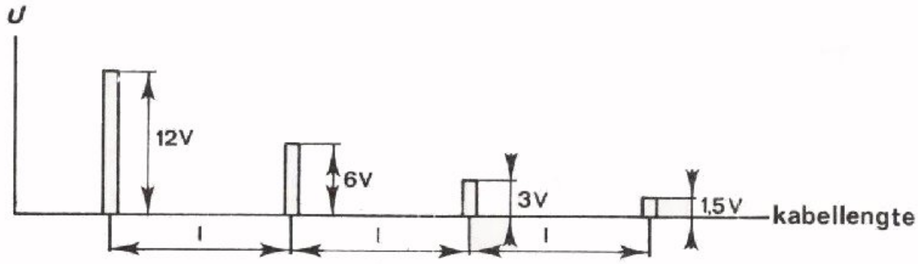
- is afsluitweerstand R niet gelijk aan R_o, dan wordt de puls gedeeltelijk gereflecteerd:
  als $R > R_o$: positief
  als $R < R_o$: negatief.

- Het optreden van *reflecties* (="gereflecteerde signalen") is ongewenst, omdat zij bij het gewenste signaal *storing* vertegenwoordigen.



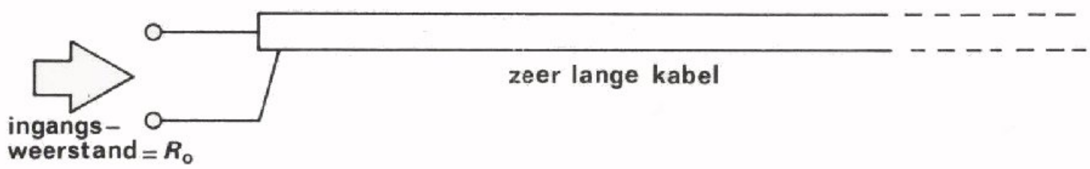
Reflecties voorkomt men door een kabel aan het einde met R_o af te sluiten. Meestal wordt hij ook aan het begin met R_o afgesloten. Dan worden door eventuele foutieve afsluiting toch nog van het einde terugkomende kleine reflecties alsnog onderdukt.

- De aanwezige weerstand heeft tot gevolg dat de grootte van het signaal afneemt als het een lange kabel doorloopt. Men noemt het energieverlies in de kabel de *kabelverliezen*



Het signaal halveert per zelfde kabellengte l.

- *De karakteristieke weerstand* R_o van een kabel is de ingangsweerstand van een buitengewoon lang stuk.

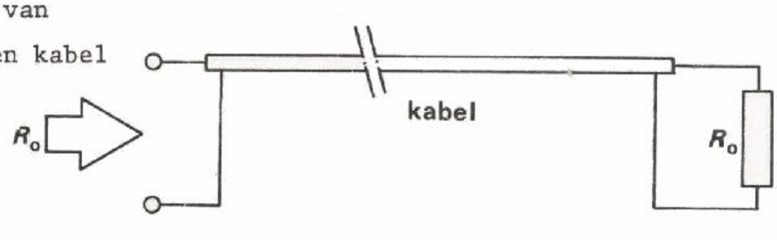


$$R_o = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$$

, waarin: L_1 = zelfinductie per m (H).

C_1 = capaciteit per m (F).

- De ingangsweerstand van een met R_o afgesloten kabel bedraagt R_o.



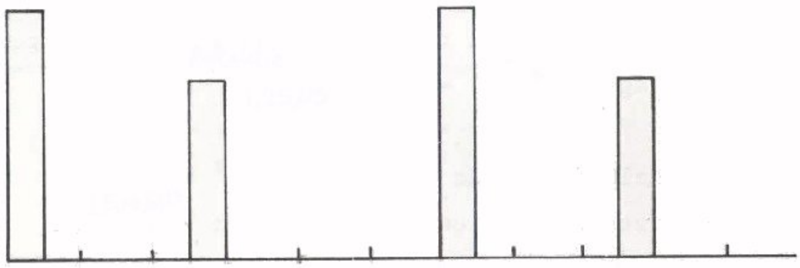
Pas er daarom voor op om kabels met verschillende R_o's "zo maar door te verbinden". Aanpassing is dan geboden.

- Een *coaxiale kabel* geeft geen storing naar buiten en pikt zelf van buiten geen storingen op. Dit dank zij de geaarde afschermmantel.

TEST UZELF

11. Een impuls van U = 100 V wordt een lange kabel ingestuurd en komt door de kabelverliezen als impuls van 80 V aan het einde. Als het einde *open* wordt gehouden, hoe groot is dan de reflectie-impuls die aan de ingang terugkomt?

12. Aan een kabel met luchtisolatie (ε_r = 1) voert men een impulsreeks toe. De kabel is aan het uiteinde open en aan het begin goed afgesloten met R_o. Het ingangssignaal maakt men zichtbaar op het scherm van een oscilloscoop. Men ziet onderstaand beeld.



De elektronenstraal schrijft zodanig, dat *time*/div. = 0,5 µs. Hoe groot is de frequentie van de oorspronkelijke impulsreeks?

f = MHz

Hoe lang is de kabel? l = m

13. Een kabel heeft per meter een capaciteit C_1 = 40 pF, terwijl R_o = 300 Ω. Bereken hoe groot de zelfinductie L_1 per meter is.

L_1 =

14. Met een kabel (R_o = 50 Ω) voert men impulsen toe aan een belasting van 7,2 kΩ. Men past aan met behulp van een transformator. Hoe groot moet men de wikkelverhouding $\frac{n_2}{n_1}$ kiezen?

$\frac{n_2}{n_1}$ =

UITWERKINGEN

11. Aan het begin 100 V en aan het eind 80 V. Een verlies dus van 20%. Aan het open eind wordt de impuls volledig gereflecteerd. Op de terugweg treedt weer 20% verlies op, zodat de reflectiespanning aan de ingang is:

$$0{,}8 \times 80 = 64 \text{ V.}$$

12. De oorspronkelijke (grote) impulsen liggen 6 "divisions" uit elkaar.

1 div. = 0,5 µs

6 div. = 6 x 0,5 µs = 3.10^{-6} s

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3.10^{-6}} = \frac{10^6}{3} \text{ Hz} = \frac{1}{3} \text{ MHz.}$$

Het tijdsverschil tussen de heengaande en de gereflecteerde impuls bedraagt 2,5 div. = $2{,}5 \;.\; 0{,}5.10^{-6}$ s

$= 1{,}25.10^{-6}$ s.

De snelheid van de impuls is 3.10^8 m/s.

De afstand "heen en terug" is dus:

$$3.10^8 \;.\; 1{,}25.10^{-6} = 375 \text{ m}$$

De lengte van de kabel is: $\frac{1}{2}$. 375 = 187,5 m.

13. $R_o = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ $\qquad L_1 = R_o^2 \;.\; C_1$

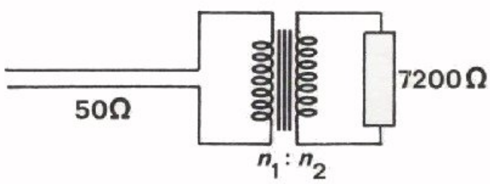
$= (300)^2 \;.\; 40.10^{-12}$

$= 9.10^4.40.10^{-12}$

$= 36.10^{-7}$ H

$= 3{,}6$ µH.

14.



$$R_{ing} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \;.\; R$$

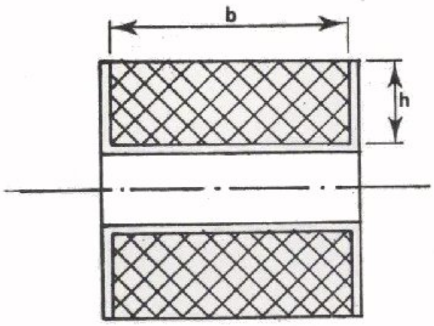
$$50 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \;.\; 7200$$

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 = \frac{50}{7200} = \frac{1}{144}$$

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right) = \frac{1}{12} \rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{12}{1}.$$

GEHEUGENSTEUN

SPOEL EN TRAFO



De vulfactor is:

$$v = \frac{n \cdot A}{b \cdot h}$$

n = aantal windingen

A = koperdoorsnede draad (mm^2)

b = wikkelbreedte (mm)

h = wikkelhoogte (mm)

- **WIKKELMETHODEN zijn:**
  - éénlaags cylindrisch (spoed s = draaddiameter d).
  - semi-bank ($s < d$; hoogstens 3 lagen).
  - hoogkant geslingerd (geen flenzen).
  - wild (wel flenzen).
  - orthocyclisch (volkomen regelmatig; thermoplac).

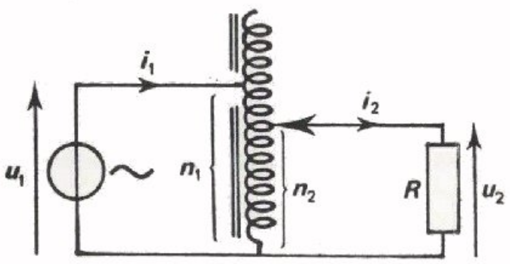
- **KERNMATERIALEN zijn:**

Si-ijzer		tot 15 kHz
ferroxcube 3		tot 1 MHz, snel verzadigd.
ferroxcube 4	0,5	tot 25 MHz, snel verzadigd.
poederijzer		boven 25 MHz.

- **MAGNETISCHE AFSCHERMING**

laagfrequent door:	Si-ijzer,
	mumetaal (snel verzadigd).
hoogfrequent door:	goed geleidende bus.

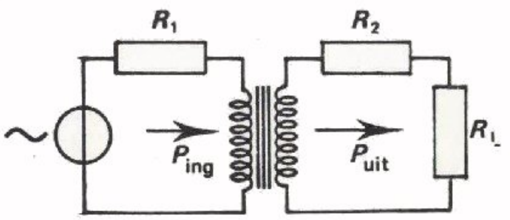
- **TRANSFORMATOR formules:**



koppelfactor $= \frac{\phi_h}{\phi_h + \phi_s}$

ϕ_h = hoofdveld

ϕ_s = spreidingsveld



$\eta = \frac{P_{uit}}{P_{in}}$ 100% = rendement

$R_i = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 R_1 + R_2$ = weerstand die R_L terugziet.